

Objektive Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der
Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Daniel Simmermacher
geboren in Gießen

Referent:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein
Tag der Einreichung:	30. April 2013
Tag der mündlichen Prüfung:	10. Juli 2013

Darmstadt, 2013

D 17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Fahrzeugentwicklung der Daimler AG in Sindelfingen und wurde von mir an der Technischen Universität Darmstadt als Dissertation eingereicht.

Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, Leiter des Fachgebiets Fahrzeugtechnik (FZD) an der TU Darmstadt, für die fachliche und persönliche Betreuung meiner Arbeit als Doktorvater. Den stets treffsicheren methodischen und inhaltlichen Anregungen ist ein großer Anteil am Erfolg meines Promotionsvorhabens beizumessen.

Ebenfalls ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein, Leiter des Instituts für Kraftfahrzeuge (ika) an der RWTH Aachen, für die freundliche Übernahme des Korreferats.

Während meiner Zeit als Doktorand im Bereich der Aktiven Sicherheit bei Mercedes-Benz konnte ich jederzeit auf die umfangreiche Unterstützung des gemeinsamen Forschungsvorhabens zählen. Mindestens in gleichem Maße bedanke ich mich daher bei meinen Betreuern und Ratgebern, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Marcus Nüssle und Herrn Dr.-Ing. Frank Baumann, sowie meinen ehemaligen Vorgesetzten und Förderern Herrn Uwe Stenzel und Herrn Dr.-Ing. Rüdiger Rutz für Ihre Unterstützung und das entgegen gebrachte Vertrauen in die Ergebnisse meiner Arbeit.

Auch den studentischen Mitarbeitern sei auf diesem Wege für ihre tatkräftige Unterstützung des Forschungsprojekts im Rahmen von Praktika und Abschlussarbeiten mein großer Dank ausgesprochen.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Familie und Freunden, die mich in den letzten Jahren auf verschiedene Weise unterstützt haben und zumeist ein hohes Maß an Verständnis für meine gelegentliche Unpässlichkeit aufbringen konnten.

Daniel Simmermacher

München, Juli 2013

Für die Fahrsicherheit

Inhalt

Formelzeichen und Abkürzungen	VIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Zielsetzung	3
1.2 Methodik.....	4
2 Stand der Forschung.....	5
2.1 Grundlagen der Fahrdynamik.....	7
2.1.1 Bewegungsgrößen des Fahrzeugs	7
2.1.2 Stationäres und dynamisches Lenkverhalten	8
2.1.3 Messtechnik.....	17
2.2 Testverfahren und objektive Kennwerte.....	20
2.2.1 Closed-Loop-Studien zur Ermittlung von Akzeptanzgrenzen	23
2.2.2 Bewegungskennwerte zur Bewertung der Fahrsicherheit.....	28
2.2.3 Bekannte Akzeptanzgrenzen für die Bewegungskennwerte	31
2.3 Fahrsicherheit und Fahrzeugführung.....	33
2.3.1 Aktive Sicherheit.....	33
2.3.2 Unfallursachen	36
2.3.3 Regelkreis Mensch-Fahrzeug.....	44
2.3.4 Anwendung von Fahrermodellen zur Bewertung der Fahrsicherheit	49
2.4 Fazit	54
3 Versuchskonzept.....	58
3.1 Zielsetzung	58
3.2 Hypothesen	58
3.3 Ableitung der Testmethodik	60
3.3.1 Testmanöver zur Bewertung von Gierstörungen.....	61
3.3.2 Testmanöver zur Bewertung von überhöhten Schwimmwinkeln	68
3.3.3 Subjektive und objektive Beherrschbarkeit	69
3.4 Variation von Gierstörungen und Schwimmwinkeln mittels HSR.....	70
3.4.1 Wirkprinzip	71
3.4.2 Validierung in Vorversuchen	73
3.5 Variation von Gierstörungen bei hohen Fahrgeschwindigkeiten.....	75
3.5.1 Fahrsimulator der Daimler AG.....	76
3.5.2 FADYS Modellvalidierung	78
3.6 Fazit	80
4 Durchführung und Methodik der Auswertung	82
4.1 Durchführung der Realstudie im kontrollierten Feld	82

4.1.1	Versuchsfahrzeug	82
4.1.2	Probandenkollektiv und Testvarianten	83
4.1.3	Geradeaus- und Kurvenbremsungen aus 80-120 km/h	84
4.1.4	Ausweichetest	86
4.2	Durchführung der Fahrsimulatorstudie	87
4.2.1	Probandenkollektiv und Testvarianten	87
4.2.2	Geradeausbremsungen aus 120-180 km/h	88
4.3	Verwendete Messtechnik	89
4.3.1	Funktionsweise des verwendeten Differential-GPS-Systems	91
4.3.2	Kursverlaufbestimmung in Geradeausfahrt	91
4.3.3	Kursverlaufbestimmung in Kurvenfahrt	93
4.3.4	Fehlerabschätzung der Abstandsbestimmung	95
4.4	Methodik der Auswertung	97
4.4.1	Kennwerte und Messdatenaufbereitung	98
4.4.2	Statistische Methoden	100
4.4.3	Prüfung auf Normalverteilung der Beobachtungsgrößen	103
4.5	Fazit	105
5	Ergebnisse	106
5.1	Korrelationen der untersuchten Kenngrößen	106
5.1.1	Bremsmanöver (80-180 km/h)	106
5.1.2	Ausweichetest (80 km/h)	108
5.2	Objektive Beherrschbarkeit von Bremsmanövern	109
5.2.1	Geradeaus- und Kurvenbremsung aus 80-120 km/h (Realstudie)	110
5.2.2	Störaufschaltung ohne gleichzeitige Bremsbetätigung bei 80 km/h	113
5.2.3	Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrsimulator)	114
5.3	Subjektive Beherrschbarkeit von Bremsmanövern	118
5.3.1	Geradeaus- und Kurvenbremsung aus 80-120 km/h (Realstudie)	118
5.3.2	Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrsimulator)	119
5.4	Vergleich von subjektiver und objektiver Beherrschbarkeit	120
5.4.1	Gegenüberstellung in Geradeausbremsungen aus 80-180 km/h	121
5.4.2	Subjektive Beherrschbarkeit von Fahrstreifenverletzungen	122
5.4.3	Nachweis von Trainingseffekten über der Versuchsdauer	123
5.5	Beherrschbarkeit des Ausweichtests mit 80 km/h	125
5.5.1	Objektives Kurshaltevermögen bei hohen HA-Schwimmwinkeln	125
5.5.2	Subjektive Beherrschbarkeit von hohen HA-Schwimmwinkeln	126
5.6	Fazit	127
6	Ermittlung von Akzeptanzgrenzen und Ausblick	130
6.1	Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen in Bremsmanövern	130

6.1.1	Methodik	130
6.1.2	Ergebnisse	133
6.1.3	Vergleich mit bisherigen Studien	136
6.2	Akzeptanzgrenzen für Schwimmwinkel im Ausweichtest	138
6.3	Bedeutung der Ergebnisse und Ausblick	139
7	Zusammenfassung.....	141
8	Anhang	143
8.1	Erwartungsbereiche der Begrenzungsabstände	143
8.1.1	Auftragung über der Open-Loop-Gierstörung	143
8.1.2	Auftragung über der Open-Loop-Querschleunigungsabweichung ...	144
8.2	Erwartungsbereiche der Subjektivbeurteilung.....	145
8.2.1	Auftragung über der Open-Loop-Gierstörung	145
8.2.2	Auftragung über der Open-Loop-Querschleunigungsabweichung ...	146
8.3	Standardisierte Testverfahren	147
8.3.1	Geradeausverhalten	147
8.3.2	Kurvenverhalten	150
8.3.3	Übergangsverhalten.....	163
8.3.4	Wechselkurvenverhalten	171
9	Quellen	183

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
a	m/s^2	Beschleunigung
b	m	Spurbreite
b_i	m	Querabstand
B	$^\circ, \text{rad}$	Breitengrad
B_s	./.	Subjektive Beherrschbarkeit
$B0-B2$./.	Beherrschbarkeitsniveau
c_a	N/rad	Schräglaufsteifigkeit
d	./.	Spannweite
D	./.	Dämpfungsmaß
F	N	Kraft
$F_{z,w}$	N	Radaufstandskraft
f	Hz	Frequenz
H_0	./.	Ausgangshypothese
i_s	./.	Lenkübersetzung
k	./.	Verstärkungsfaktor
K	./.	Konstante
l	m	Radstand
l_v	m	Abstand Fzg.-Schwerpunkt zu Vorderachse
l_h	m	Abstand Fzg.-Schwerpunkt zu Hinterachse
l_i	m	Längsabstand
L	$^\circ, \text{rad}$	Längengrad
L_p	m	Vorausschaulänge
m_{Fzg}	kg	Fahrzeugmasse
M_H	Nm	Lenkradmoment
M_Z	Nm	Giermoment
n	./.	Anzahl
p	./.	Wahrscheinlichkeit
R	m	Kurvenradius
R_p	./.	Korrelationsmaß nach Pearson
R^2	./.	Bestimmtheitsmaß
v	m/s	Geschwindigkeit
s	./.	Laplace-Operator
S	%	Schlupf
t	s	Zeitvariable
T	s	Zeitverzug
T_p	s	Vorausschauzeit

T_z	./.	Zählerzeitkonstante
U	./.	Überschwingweite

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
α	°, rad	Schräglaufwinkel
α_s	./.	Signifikanzniveau
β	°, rad	Schwimmwinkel
δ_H	°, rad	Lenkradwinkel
δ_A	°, rad	Ackermannwinkel
δ_D	°, rad	Dynamischer Bezugslenkwinkel
δ_v	°, rad	Lenkwinkel an der Vorderachse
δ_h	°, rad	Lenkwinkel an der Hinterachse
θ	kgm ²	Massenträgheitsmoment
κ	1/m	Krümmung
μ	./.	Reibwert
σ	1/s	Abklingkonstante
φ	°, rad	Wankwinkel
ψ	°, rad	Gierwinkel
ω	1/s	Kreisfrequenz

Indizes

Zeichen	Bezeichnung
0	Startposition, Nullstellung
$1s$	nach einer Sekunde
$corr$	Correxit
e	Endposition, Endzeitpunkt
$Fusi$	Funktionale Sicherheit
ges	Gesamtwert
$grenz$	Grenzwert
h	hinten
HA	Hinterachse
i	Laufzähler
ist	Istwert
Int	Interpolation
$krit$	kritisch
LL	Leitlinie
max	Maximalwert
min	Minimalwert
Obj	Objektiv

<i>prop</i>	proportional
<i>Pos</i>	Position
<i>red</i>	reduziert
<i>ref</i>	Referenzwert
<i>res</i>	resultierend
<i>Reg</i>	Regression
<i>stat</i>	Stationärwert
<i>soll</i>	Sollwert
<i>SP</i>	Schwerpunkt
<i>Subj</i>	Subjektiv
<i>v</i>	vorne
<i>VA</i>	Vorderachse
<i>x</i>	Längsrichtung
<i>y</i>	Querrichtung
<i>z</i>	Vertikalrichtung

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
<i>ABS</i>	Anti-Blockier-System
<i>AFS</i>	Active Front Steering
<i>ASIL</i>	Automotive Safety Integrity Level
<i>ASR</i>	Antriebsschlupfregelung
<i>BA</i>	Begrenzungsabstand
<i>CI</i>	Confidence Interval (Vertrauensbereich)
<i>DSC</i>	Dynamic Stability Control
<i>EG</i>	Eigenlenkgradient
<i>EPS</i>	Electric Power Steering
<i>ESP</i>	Elektronisches-Stabilitäts-Programm
<i>FLC</i>	Fuzzy Logic Controller
<i>Fzg</i>	Fahrzeug
<i>GPS</i>	Global Positioning System
<i>HA</i>	Hinterachse
<i>HSR</i>	Hinterrad-Schräglaufwinkel-Regelung
<i>KS</i>	Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lilliefors
<i>NN</i>	Neuronales Netz
<i>SBB</i>	Spurbreitenbedarf
<i>SW</i>	Shapiro-Wilk-Test
<i>VA</i>	Vorderachse

1 Einleitung

Obwohl eine sichere Kursführung die anerkannt wichtigste Aufgabe des Fahrers ist und auch im Berichtsjahr 2010 immer noch ca. 40 % aller Verkehrsunfälle mit Todesopfern auf den Verlust der Fahrzeugkontrolle zurückzuführen sind¹, erfolgt nur in Ausnahmefällen, wie z.B. bei Wallentowitz et al.² oder Freitag et al.³, eine objektive Bewertung des tatsächlichen Kurshaltevermögens von Testpersonen in Abhängigkeit verschiedener Fahrzeugvarianten oder Störeinflüsse. Während die Testverfahren zur Ermittlung von objektiven Fahreigenschaftskennwerten ohne Fahrereinfluss heute überwiegend standardisiert sind⁴ und durch die Fahrzeughersteller angewandt werden⁵, ist der Zusammenhang zwischen den bekannten objektiven Bewegungskennwerten und der tatsächlichen Beherrschbarkeit des Fahrverhaltens noch weitestgehend unerforscht. Die Gründe sind zum einen in der Schwierigkeit zu sehen, das objektive Kurshaltevermögen von Testpersonen messtechnisch zu erfassen⁶, aber auch in der gängigen Annahme, ein von Testpersonen subjektiv als „sicher“ beurteiltes Fahrzeugverhalten sei jederzeit auch objektiv sicher zu führen, siehe Neukum et al.⁷.

Dabei ist der Ansatz, den Fahrer und seine Reaktionen in die Betrachtung der Fahr-sicherheit mit einzubeziehen, nicht neu und wurde bereits in den 60er Jahren als notwendig erachtet, siehe z.B. Enke⁸, Fiala⁹, Rashevsky¹⁰ und Wallner¹¹. Zur Minimierung von Unfallrisiken muss der Fahrer in Abhängigkeit des Streckenverlaufs und der Fahrsituation objektiv sichere Führungsgrößen wählen¹² und das Fahrzeug in der Folge möglichst exakt auf dem gewählten Sollkurs stabilisieren¹³. Bis heute wird die Fahrzeugführung und Stabilisierung als primäre Aufgabe des Fahrers verstanden¹⁴. Zur Unterstützung einer sicheren Kurführung sollen die Bewegungen des Fahrzeugs möglichst exakt den

¹ Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle 2010, S. 58ff

² Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

³ Freitag et al. (2001): Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen

⁴ Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 20

⁵ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW, S. 3

⁶ Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 300

⁷ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 3

⁸ Enke (1966): Zusammenwirken von Fahrzeuglenker und Automobil, S.37ff

⁹ Fiala, Wallner (1968): Untersuchung des Systems Fahrzeug-Fahrer bei einer Lenkung mit Zeitvorhalt

¹⁰ Rashevsky (1966): Neglected Factors in Highway Safety

¹¹ Wallner (1967): Zum Verhalten des Fahrzeuglenkers als regelungstechnisches Problem, S. 54ff

¹² Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren, S. 5

¹³ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 217

¹⁴ Bruder et al. (2007): Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung, S. 79ff

Erwartungen des Fahrers entsprechen¹⁵ und das Fahrzeug allgemein „leicht zu führen“ sein.¹⁶

Der Stabilität in Brems- und Ausweichmanövern kommt aufgrund der relativen Häufigkeit dieser Fahrmanöver in unfallrelevanten Fahrsituationen eine hohe Bedeutung zu.^{17,18} Mit Beginn der 70er-Jahre wurden daher einheitliche Tests zur Bewertung des Fahrzeugverhaltens und insbesondere der Bremsstabilität gesucht. Das Ziel war es, objektive Bewertungskriterien zu finden.¹⁹ Der Ansatz hierzu ist bis heute die Betrachtung des Zusammenhangs von Subjektivbeurteilungen mit objektiven Fahreigenschaftskennwerten.^{20,21,22} Die Bewertung der Brems- und Lastwechselstabilität in Geradeaus- und Kurvenfahrt wurde daher mittlerweile standardisiert und in Normungen überführt.^{23,24,25} Die Testmanöver werden überwiegend ohne Berücksichtigung des Fahrerinflusses in Form von sogenannten Open-Loop-Tests mit fixiertem Lenkrad (fixed control) durchgeführt. Als Bewertungsgrößen der Brems- und Lastwechselstabilität aus einem stationären Ausgangszustand heraus haben sich heute vor allem die Abweichung der Giergeschwindigkeit eine Sekunde nach Bremsbeginn bzw. Lastwechselzeitpunkt $\Delta\dot{\psi}_{1s}$ und die maximale Abweichung der Giergeschwindigkeit $\Delta\dot{\psi}_{\max}$, jeweils bezogen auf den stationären Ausgangszustand, durchgesetzt, siehe z.B. Sagan²⁶, ISO 14512²⁷ oder Neukum et al.²⁸. Zur Bewertung der Stabilität in Folge querdynamischer Lenkanregungen werden hingegen hauptsächlich die auftretenden Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt ausgewertet, siehe z.B. Fach et al.²⁹ und von Glasner³⁰. Nach Rönitz³¹ sind der auftretende Schwimmwinkel und die Gierbewegung des Fahrzeugs in fast allen stationären und instationären Fahrmanövern zur Bewertung der Fahrstabilität geeignet.

Bei konsequenter Anwendung eines rein auf objektiven Bewegungskennwerten beruhenden Bewertungsverfahrens könnte das Fahrverhalten eines Fahrzeugs dann als objektiv fahrsicher eingestuft werden, wenn die betrachteten Bewegungskennwerte inner-

¹⁵ Donges (1992): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium

¹⁶ HeiBing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

¹⁷ Rompe, HeiBing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, S. 12

¹⁸ Weiß (1988): Untersuchung und Rekonstruktion von Ausweich- und Fahrspurwechselvorgängen

¹⁹ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 13f

²⁰ Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop, S. 1

²¹ Riedel, Arbinger (1997): Subjektive und Objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von PKW

²² Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 24ff

²³ ISO 14512 (1999): Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction

²⁴ ISO 7975 (1985): Braking in a turn – Open loop test procedure (first edition)

²⁵ ISO 9816 (2006): Power-off reaction of a vehicle in a turn – Open-loop test method

²⁶ Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 21

²⁷ ISO 14512 (1999): Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction, S. 8

²⁸ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 10f

²⁹ Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme, S. 74

³⁰ von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 14

halb definierter Akzeptanzgrenzen liegen. Einheitliche oder gar genormte Akzeptanzgrenzen der Bewegungskenngößen in Brems- und Ausweichmanövern existieren bisher allerdings nicht. Die subjektive Fahrzeugbewertung erfolgt nach Neukum/Krüger häufig nur in Relation zu einer Standardvariante und ist daher nicht geeignet, absolute Akzeptanzgrenzen abzuleiten.³² Anhaltspunkte für Akzeptanzgrenzen von Gierstörungen liefern bisher lediglich veröffentlichte Subjektivurteile von Testfahrern aus den 70er- und 80er-Jahren^{33,34} sowie aktuelle Untersuchungen zu Störungen durch elektronische Fahrzeugkomponenten, z.B. durch aktive Überlagerungslenkung³⁵ (Active Front Steering AFS), Vertikaldynamikstörung³⁶ und Hinterradlenkung³⁷ (Hinterrad-Schräglaufrinkel-Regelung HSR). Die vorgeschlagenen Akzeptanzgrenzen der Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ weichen jedoch auch bei vergleichbaren Fahrgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Störanregung mit empfohlenen Werten zwischen 2,5-12°/s deutlich voneinander ab. Die Werte der maximal tolerierten Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt $\beta_{SP,\max}$ bei kombinierten Lenk- und Bremsmanövern sind mit Akzeptanzaussagen zwischen 5-20°/s ebenfalls unterschiedlich, siehe Keinert³⁸ (5°) und Witte³⁹ (20°).

Das resultierende objektive Kurshaltevermögen wird in diesen Studien nicht betrachtet. Auf Basis der vorhandenen Erkenntnisse kann daher keine objektiv begründete Aussage getroffen werden, bis hin zu welchen Werten der betrachteten Bewegungskenngößen in Brems- und Ausweichtests Normalfahrer⁴⁰ noch in der Lage sind, ein Fahrzeug „sicher“ zu führen.

1.1 Zielsetzung

In dieser Arbeit soll das objektive Kurshaltevermögen eines kundenrepräsentativen Probandenkollektivs in Brems- und Ausweichtests in Abhängigkeit der zur Bewertung von Fahrstabilität bekannten Stabilitäts-Kennwerte ermittelt werden. Auf Basis des ermittelten objektiven Kurshaltevermögens sollen Akzeptanzgrenzen für die betrachteten Stabi-

³¹ Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

³² Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethodik, S. 301f

³³ Fiat (1975): Proposal for Straight-Line and In-A-Turn Braking Test Procedures

³⁴ Otto (1987): Lastwechselreaktionen von PKW bei Kurvenfahrt, S. 43

³⁵ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 10f

³⁶ Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug- Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, S. 92

³⁷ Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

³⁸ Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

³⁹ Witte (1995): Stabilisierung der Gierbewegung in kritischen Fahrzuständen

⁴⁰ Unter dem Begriff *Normalfahrer* werden nach Ullmann (2006, Der Normalfahrer als Messgröße für die Optimierung und Absicherung aktiver fahrdynamischer Regelsysteme) und in dieser Arbeit Fahrer verstanden, „...die nicht über beruflich (Versuchsfahrer) oder privat (Hobbyrennfahrer) begründete besondere Fähigkeiten oder Fertigkeiten bezüglich des Fahrens im querdynamischen Grenzbereich verfügen.“

litäts-Kennwerte abgeleitet werden, innerhalb derer das Fahrzeug in Brems- und Ausweichtests für Normalfahrer nach objektiven Kriterien sicher zu führen ist.

1.2 Methodik

Bild 1.1 fasst das Vorgehen in dieser Arbeit zusammen. Als Grundlage der durchgeführten Studie wird in Kapitel 2 der aktuelle Stand der objektiven Bewertung von Fahrsicherheit aufgezeigt. Dieser Stand umfasst zunächst die objektive Beschreibung von Fahrsicherheit in zahlreichen Testmanövern durch objektive Bewegungskenngrößen. Darüber hinaus wird die Bedeutung der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug aus Sicht der Aktiven Sicherheit diskutiert und auf veröffentlichte Vorschläge für Akzeptanzgrenzen der objektiven Bewegungskenngrößen des Fahrzeugs eingegangen.

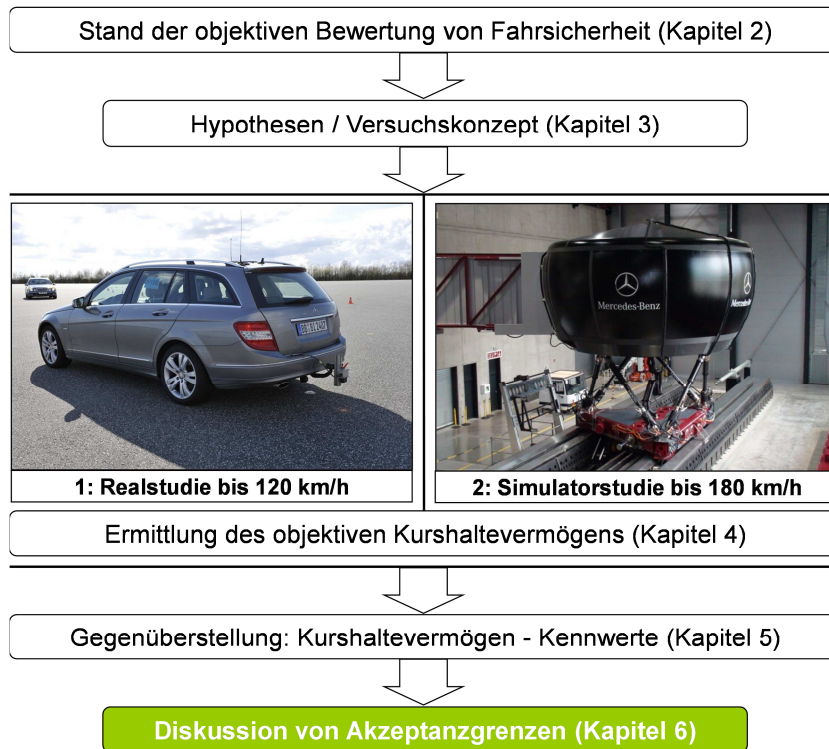


Bild 1.1 Methodik der durchgeführten Untersuchung von objektivem Kurshaltevermögen

Auf Basis der bereits vorhandenen Erkenntnisse aus der Literatur werden in Kapitel 3 Hypothesen zu dem erwarteten Kurshaltevermögen von Normalfahrern aufgestellt und das zur Prüfung dieser Hypothesen benötigte Versuchskonzept abgeleitet.

Die Ermittlung des Kursführungsvermögens in Kapitel 4 erfolgt in zwei umfangreichen Probandenstudien mit jeweils ca. 100 Versuchspersonen auf einem abgesperrten Testgelände und am Fahrsimulator der Daimler AG. Zur Variation der Bewegungskenngrößen in den verschiedenen Testmanövern wird eine aktive Hinterradverstellung verwendet.

Das resultierende Kurshaltevermögen der Normalfahrer innerhalb vorgegebener Fahr-gassen wird durch ein hochpräzises Differential-GPS-System erfasst.

Das ermittelte Kurshaltevermögen der Testpersonen wird in Kapitel 5 den objektiven Bewegungskenngrößen des Fahrzeugs gegenübergestellt. Aus dieser Gegenüberstellung werden in Kapitel 6 mögliche Akzeptanzgrenzen dieser Kennwerte abgeleitet und disku-tiert, die eine sichere Kursführung durch Normalfahrer gewährleisten sollen.

2 Stand der Forschung

Im Fokus der anfänglichen Betrachtung von Fahrsicherheit steht nach Zomotor⁴¹ An-fang des 19. Jahrhunderts die Sorge einer unkontrollierten Schleuderbewegung des Fahrzeugs in Folge schneller Lenkbewegungen oder Bremsungen. Hierzu werden erste Slalom-Tests auf eingefetteten Holzbohlen durchgeführt. Eine mathematische Beschrei-bung des Lenkverhaltens von Fahrzeugen in stationären und dynamischen Manövern ist zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht bekannt und folgt erst in den 40er-Jahren⁴², ebenfalls aufgeführt bei Zomotor. Die nächsten wesentlichen Schritte auf dem Weg zur heutigen Bewertungsmethodik sind die Entwicklung portabler Messtechnik in den 60er-Jahren⁴³ und die schrittweise Vereinheitlichung der Testmanöver und Auswerteverfahren seit den 70er-Jahren, z.B. nach Mitschke et al.⁴⁴ und Rompe/Heißing⁴⁵. Das Ziel dieser Bemühungen ist die eingangs erwähnte Beschreibung des Fahrverhaltens in einheitli-chen Prüfverfahren und durch objektive Bewegungskennwerte. Hierdurch soll die Be-wertung der Fahrzeuge vom Urteil einzelner Testfahrer losgelöst werden⁴⁶ und ver-schiedene Fahrzeuge untereinander besser verglichen werden können.⁴⁷ Heute sind so-wohl die Durchführung und messtechnische Erfassung als auch die Auswertung des Fahrverhaltens in zahlreichen Testmanövern genormt und werden nach Zomotor et al.⁴⁸ von allen Fahrzeugherstellern angewandt.

Bild 2.1 zeigt das heutige Vorgehen von Fahrzeugherstellern zur Bewertung und Absi-cherung von Fahrsicherheit, wie es z.B. für das Testmanöver *Sine with dwell* aus dem zulassungsrelevanten Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) No. 126 der Na-tional Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) hervorgeht⁴⁹, Details siehe An-

⁴¹ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 12ff

⁴² Riekert, Schunck (1940): Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs

⁴³ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁴⁴ Mitschke et al. (1986): Untersuchung des Fahrverhaltens von PKW bei Kurvenfahrt

⁴⁵ Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

⁴⁶ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 13f

⁴⁷ Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, S. 11

⁴⁸ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW, S. 3

⁴⁹ NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-1ff

hang 8.3.4. Die Fahrzeuge werden in einer Vielzahl von Testmanövern geprüft, die als relevant in Bezug auf die spätere Beherrschbarkeit des Fahrzeugs durch den Nutzer beurteilt werden. Zur Bewertung des Fahrverhaltens in diesen Testmanövern werden diejenigen Kennwerte verwendet, die nach bisherigen Forschungen besonders gut mit den Urteilen von Testfahrern korrelieren und somit zur objektiven Beschreibung des Fahrverhaltens geeignet erscheinen, siehe ausführliche Beschreibung der Testverfahren und Kriterien in Anhang 8.3. Das Fahrverhalten wird anschließend mittels portabler Messtechnik in Erprobungsfahrzeugen erfasst und durch die Bewegungskennwerte objektiviert. Eine Alternative zu Testfahrten mit Entwicklungsfahrzeugen sind heute Simulationsverfahren mit virtuellen Fahrzeugmodellen. Durch die sogenannte „virtuelle Erprobung“ kann das Fahrverhalten des späteren Fahrzeugs bereits in den frühen Phasen der Entwicklung abgeschätzt und unter Einbeziehung von Fahrdynamik-Regelsystemen optimiert werden, siehe z.B. Bewersdorff et al.⁵⁰ und Dragon⁵¹.



Bild 2.1 Methodik der Bewertung von Fahrsicherheit durch die Fahrzeughersteller (Schritte 1-3) und nicht standardisierte Absicherung (Schritt 4)

Eine Standardisierung des zur vollständig objektiven Absicherung notwendigen Bewertungsschritts 4 aus Bild 2.1 – der Abgleich mit Akzeptanzgrenzen – ist mit Ausnahme der FMVSS No. 126 bisher jedoch nicht bekannt. Die Kriterien zur Absicherung des Fahrzeugverhaltens in den übrigen Testmanövern sind somit den Fahrzeugherstellern überlassen. Die Festlegung von Akzeptanzgrenzen ist daher nach den bereits geleisteten Bemühungen um eine Vereinheitlichung von Testmanövern und Bewertungskriterien der nächste wesentliche Schritt in Richtung einer standardisierten Absicherung von Fahrsicherheit. Neben den gängigen Prüfverfahren und objektiven Bewegungskenngrößen werden in diesem Kapitel bisherige Vorschläge und Möglichkeiten zur Definition von Akzeptanzgrenzen für die bekannten Bewegungskenngrößen diskutiert.

⁵⁰ Bewersdorff et al. (2007): Simulation und Bewertung der Fahrdynamikeigenschaften im Grenzbereich, S. 56ff

⁵¹ Dragon (1996): FADYS Fahrdynamikmodell, S. 117ff

2.1 Grundlagen der Fahrdynamik

2.1.1 Bewegungsgrößen des Fahrzeugs

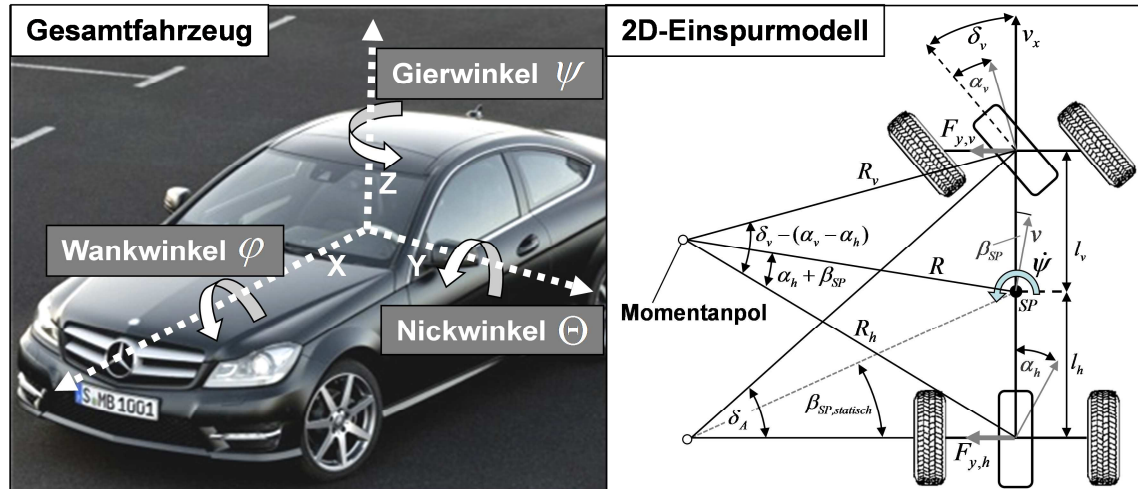


Bild 2.2 Bewegungsgrößen des Fahrzeugs nach DIN 70000 und vereinfachtes Einspurmodell nach Zomotor⁵²

Die Möglichkeit zur messtechnischen Erfassung der Bewegungen des Fahrzeugs ist die Basis für eine objektive Bewertung des Fahrzeugverhaltens. Hieraus werden manöverspezifische objektive Bewegungskenngrößen gebildet, die das Fahrzeugverhalten in Form von objektiven Kennwerten charakterisieren. Bild 2.2 zeigt die erstmals 1983 standardisierten Bewegungsgrößen eines Fahrzeugs nach DIN 70000⁵³ und die reduzierte Darstellung der Fahrzeugbewegungen auf der Fahrbahnebene im sogenannten Einspurmodell nach Zomotor. Die Reduktion der sechs Bewegungsfreiheitsgrade des Gesamtfahrzeugs auf drei Freiheitsgrade – Translation in X- und Y-Richtung sowie die Drehbewegung um die Hochachse – ist eine gebräuchliche Vereinfachung der wesentlichen Bewegungszusammenhänge des Fahrzeugs, da die Beurteilung des Fahrverhaltens hinsichtlich Stabilität und Fahrsicherheit nach Rönitz⁵⁴ und Wallentowitz et al.⁵⁵ in fast allen stationären und instationären Manövern über den Schwimmwinkel β_{SP} und die Gierrate $\dot{\psi}$ erfolgen kann. Im Einspurmodell werden beide Räder einer Achse zusätzlich zu einem einzigen Rad pro Achse zusammengefasst, woraus eine vereinfachte Betrachtung der am Fahrzeug angreifenden Reifenkräfte in Folge der Summenschräglaufsteifigkeiten beider Achsen, $c_{\alpha,v}$ und $c_{\alpha,h}$, resultiert.

⁵² Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 99

⁵³ DIN 70000 (1991): Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe, S. 11

⁵⁴ Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

⁵⁵ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

2.1.2 Stationäres und dynamisches Lenkverhalten

Die vereinfachte Betrachtung der Bewegungszusammenhänge des Fahrzeugs im Einspurmodell kann nach Zomotor verwendet werden, um das stationäre und dynamische Lenkverhalten des Fahrzeugs mathematisch zu beschreiben.⁵⁶ Aus der angenommenen Summen-Schräglauftsteifigkeit der Räder beider Achsen $c_{\alpha,v}$, $c_{\alpha,h}$ und der Schräglaufwinkel α_v , α_h resultieren die Seitenkräfte

$$F_{y,v} = c_{\alpha,v} \cdot \alpha_v \text{ mit } \alpha_v = \delta_v - \beta_{SP} - \frac{\dot{\psi} \cdot l_v}{v} \quad (2.1)$$

und

$$F_{y,h} = c_{\alpha,h} \cdot \alpha_h \text{ mit } \alpha_h = -\beta_{SP} + \frac{\dot{\psi} \cdot l_h}{v}. \quad (2.2)$$

Da in dieser Betrachtung von konstanten Schräglauftsteifigkeiten ausgegangen wird, liegt eine linearisierte Modellbetrachtung des Fahrzeugs vor. Zur weiteren Vereinfachung der Bewegungsgleichungen erfolgt bei Zomotor in den Gleichungen (2.1) und (2.2) eine Annahme kleiner Winkel, so dass gilt: $\sin(x) = x$, $\tan(x) = x$ und $\cos(x) = 1$. Mit der Fahrzeugmasse m_{Fzg} , der Gierträgheit des Fahrzeugs Θ_Z und den Radständen l_v , l_h ergibt sich das Kräftegleichgewicht in Querrichtung Y zu

$$m_{Fzg} \cdot (\dot{\psi} + \dot{\beta}) = F_{y,v} + F_{y,h} \quad (2.3)$$

sowie das Momentengleichgewicht um die Hochachse im Schwerpunkt zu

$$\Theta_Z \cdot \ddot{\psi} = F_{y,v} \cdot l_v - F_{y,h} \cdot l_h. \quad (2.4)$$

Zusammengefasst ergeben sich aus (2.1) bis (2.4) die beiden Bewegungsgleichungen des linearen Einspurmodells

$$m_{Fzg} \cdot v \cdot \dot{\beta} + \frac{1}{v} \cdot (m_{Fzg} \cdot v^2 + c_{\alpha,v} \cdot l_v - c_{\alpha,h} \cdot l_h) \cdot \dot{\psi} + (c_{\alpha,v} + c_{\alpha,h}) \cdot \beta - c_{\alpha,v} \cdot \delta_v = 0 \quad (2.5)$$

und

$$\Theta_Z \cdot \ddot{\psi} + \frac{1}{v} \cdot (c_{\alpha,v} \cdot l_v^2 + c_{\alpha,h} \cdot l_h^2) \cdot \dot{\psi} - (c_{\alpha,h} \cdot l_h - c_{\alpha,v} \cdot l_v) \cdot \beta - c_{\alpha,v} \cdot l_v \cdot \delta_v = 0. \quad (2.6)$$

Der Lenkwinkel δ_v eines konventionell an der Vorderachse gelenkten Fahrzeugs resultiert aus dem Lenkradwinkel δ_H und der effektiven Lenkübersetzung i_s .

⁵⁶ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 102ff

$$\delta_v = \frac{\delta_H}{i_s} \quad (2.7)$$

Das Fahrverhalten auf der Betrachtungsebene des Einspurmodells ist bei den gegebenen Fahrzeugparametern Fahrzeugmasse m_{Fzg} , Gierträgheit Θ_z und Radständen l_i also lediglich von den Modellparametern der beiden Summen-Schräglaufsteifigkeiten der Achsen $c_{\alpha,i}$ und der effektiven Lenkübersetzung i_s abhängig. Alle Fahrzeug- und Umgebungseigenschaften, die das Fahrverhalten des Fahrzeugs in der vollständigen Systembetrachtung bestimmen, z.B. Reifeneigenschaften, Achskinematik, Achssteifigkeiten, Feder- und Dämpfungsraten, Aerodynamik, Lenkungssteifigkeit, Karosseriesteifigkeit, Fahrbahnbeschaffenheit und weitere Größen, aufgeführt u.a. bei Braess⁵⁷, Mitschke⁵⁸ und Zomotor⁵⁹, sind in diesen drei charakteristischen Modellparametern zusammengefasst. Mit der effektiven Lenkübersetzung über dem Lenkradwinkel und der Achs-Schräglaufsteifigkeiten beider Achsen über dem Schräglaufwinkel kann das Fahrverhalten eines Fahrzeugs auch mit einem Einspurmodell bis in den Bereich der Kraftschlussgrenze beschrieben werden, siehe Diebold et al.⁶⁰.

Das Lenkverhalten als wesentlicher Bestandteil des Fahrverhaltens ist durch die Fahrzeugreaktion auf alle Lenkeingaben des Fahrers beschrieben. In Bezug auf das Lenkverhalten werden in DIN 70000⁶¹ die Begriffe des Eigenlenkverhaltens definiert und von Zomotor⁶² diskutiert. Das Eigenlenkverhalten umfasst demnach „...die vom Fahrer unabhängigen Lenkeigenschaften des Fahrzeugs.“ Zur Fahrt auf einem definierten Kurvenradius R wird bei niedriger Querbewegung und somit querschleppfreiem Abrollen der Räder zunächst der Vorderrad-Lenkwinkel

$$\delta_A = \arctan\left(\frac{l}{\sqrt{R^2 - l_h^2}}\right) \approx \frac{l}{R} \quad (2.8)$$

benötigt, auch „Ackermannwinkel“ genannt. Das Verhältnis von Radstand zu Kurvenradius wird in DIN 70000 als „dynamischer Bezugslenkwinkel“

$$\delta_D = \frac{l}{R} \quad (2.9)$$

⁵⁷ Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

⁵⁸ Mitschke (1990): Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band C

⁵⁹ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

⁶⁰ Diebold et al. (2006): Einspurmodell für die Fahrdynamiksimulation und -analyse, S. 962ff

⁶¹ DIN 70000 (1991): Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe, S. 7

⁶² Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 105ff

bezeichnet.⁶³ Auch bei querschluuffreiem Abrollen tritt konstruktionsbedingt nach Bild 2.2 (rechts) ein statischer Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt

$$\beta_{SP,statish} = \arctan \left(\frac{l_h}{\sqrt{R^2 - l_h^2}} \right) \approx \frac{l_h}{R} \quad (2.10)$$

auf. Mit steigender Querbeschleunigung rollen die Räder nicht mehr querschluuffrei ab und das Verhältnis der Achs-Schräglauftiefigkeiten von Vorder- und Hinterachse bestimmt zusammen mit der Fahrzeuggeometrie die Änderung des benötigten Lenkradwinkels. Nach DIN 70000 wird das Eigenlenkverhalten mathematisch durch den Eigenlenkgradienten EG als Differenz der auf die Lenkübersetzung i_s bezogenen Änderung des benötigten Lenkradwinkels δ_H über einer Änderung der Querbeschleunigung a_y und der Änderung des dynamischen Bezugslenkwinkels $\delta_D \approx \delta_A$ über der Querbeschleunigung beschrieben.

$$EG = \frac{1}{i_s} \cdot \frac{d\delta_H}{da_y} - \frac{d\delta_D}{da_y} \quad (2.11)$$

Im stationären Fahrzustand kann aus (2.11) unter der Annahme eines konstanten Eigenlenkgradienten im linearen Einspurmodell daher der für eine Querbeschleunigung $a_{y,i,stat}$ benötigte Lenkradwinkel

$$\delta_{H,i,stat} = i_s \cdot (\delta_D + EG \cdot a_{y,i,stat}) \quad (2.12)$$

abgeleitet werden. Über den benötigten Lenkradwinkel δ_H bzw. Lenkwinkel δ_v in stationärer Kreisfahrt des linearen Einspurmodells aus (2.12) und (2.7) kann der Eigenlenkgradient EG anhand der Bewegungsgleichungen des Einspurmodells aus (2.5) und (2.6) beispielsweise über die Fahrzeugparameter des Einspurmodells $m_{Fzg}, l, l_v, l_h, c_{\alpha,v}, c_{\alpha,h}$ oder auch in Abhängigkeit der Schräglaufwinkeldifferenz zwischen Vorder- und Hinterachse ($\alpha_v - \alpha_h$) ausgedrückt werden:⁶⁴

$$EG = \frac{m_{Fzg} \cdot (c_{\alpha,h} \cdot l_h - c_{\alpha,v} \cdot l_v)}{l \cdot c_{\alpha,v} \cdot c_{\alpha,h}} \quad (2.13)$$

$$EG = (\alpha_v - \alpha_h) \cdot \frac{R}{v^2} \quad (2.14)$$

⁶³ DIN 70000 (1991): Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe, S. 7

⁶⁴ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 105ff

Zur Bestimmung des Eigenlenkgradienten EG existieren nach Zomotor zwei verschiedene Möglichkeiten der Durchführung:

- Steigerung der Fahrgeschwindigkeit auf einem festen Kurvenradius (Ackermannwinkel konstant)
- Quasistationäres Lenkungsziehen mit konstanter Geschwindigkeit (Ackermannwinkel nicht konstant)

Der Ackermannwinkel δ_A bzw. der dynamische Bezugslenkwinkel δ_D eines Fahrzeugs sind bei festem Radstand l nach (2.8) bzw. (2.9) nur vom Kurvenradius R abhängig und erhöhen sich in stationärer Kreisfahrt ($R = v^2 / a_{y,stat}$) somit bei Variante 2 (konstante Fahrgeschwindigkeit und gesteigerte Querbesehleunigung) linear mit der Querbesehleunigung.⁶⁵

$$\delta_A \approx \delta_D = \frac{l}{v^2} \cdot a_{y,stat} \quad (2.15)$$

Die heute verwendeten Begrifflichkeiten des Eigenlenkverhaltens, *Untersteuern*, *Übersteuern* und *neutrales Verhalten*, gehen nach Zomotor bereits auf die 30er-Jahre zurück und wurden seinerzeit von Olley auf die Differenz der Schräglaufwinkel von Vorder- und Hinterachse ($\alpha_v - \alpha_h$) bezogen. Wie (2.14) zeigt, kann der Eigenlenkzustand unter der Voraussetzung eines linearen Einspurmodells (konstante Schräglaufsteifigkeiten und konstante Lenkübersetzung) im stationären Fahrzustand gleichermaßen über den Eigenlenkgradienten und die resultierende Schräglauddifferenz klassifiziert werden:

- Untersteuern: $EG > 0$ bzw. $\alpha_v - \alpha_h > 0$
- Übersteuern: $EG < 0$ bzw. $\alpha_v - \alpha_h < 0$
- neutrales Verhalten: $EG = 0$ bzw. $\alpha_v - \alpha_h = 0$

Der Eigenlenkgradient nach DIN 70000 basiert jedoch nach (2.11) auf der Änderung des benötigten und durch den Fahrer spürbaren Lenkradwinkels δ_H in Abhängigkeit der Querbesehleunigungsänderung. Die Klassifizierungen des Eigenlenkverhaltens nach Olley und DIN 70000 sind also nur im stationären Fahrzustand und unter der Annahme eines linearen Einspurmodells mit konstanter Lenkübersetzung vergleichbar. Bild 2.3 (links) zeigt die Ermittlung des stationären Eigenlenkgradienten mit konstanter Fahrgeschwindigkeit, d.h. radiusabhängigem Ackermannwinkel, am Beispiel eines nicht linearen Fahrzeugverhaltens mit konstanter Lenkübersetzung i_s : Während Fahrzeug A bis in

⁶⁵ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 107

den hohen Querbeschleunigungsbereich hinein ein zunehmend untersteuerndes Fahrverhalten zeigt ($EG > 0$), verhält sich Fahrzeug B trotz zunächst untersteuerndem Fahrverhalten ab einer bestimmten Querbeschleunigung übersteuernd ($EG < 0$). Von einem übersteuerndem Fahrverhalten wird bei konstanter Lenkübersetzung also auch dann gesprochen, wenn im niedrigen Querbeschleunigungsbereich zwar $EG > 0$ gilt, der benötigte Lenkwinkel $\delta_v = \delta_H / i_s$ ab einer gewissen Querbeschleunigung aber weniger stark ansteigt als der zugehörige Ackermannwinkel bzw. Bezugslenkwinkel.

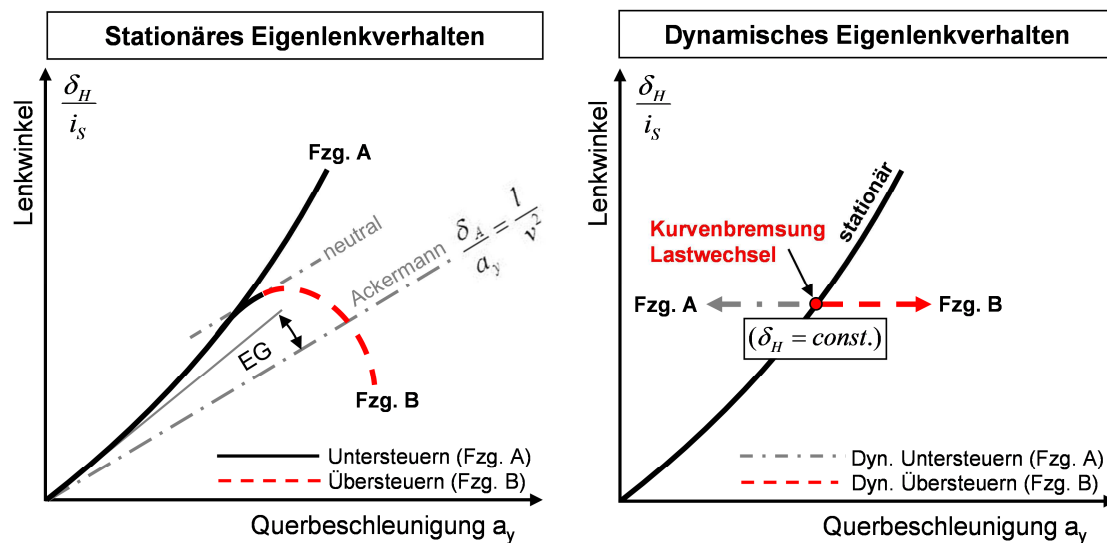


Bild 2.3 Bestimmung des Eigenlenkgradienten mit konstanter Fahrgeschwindigkeit (links) nach Zomotor⁶⁶ und Darstellung eines instationären Übersteuerns in Folge Kurvenbremsung (rechts)

Mit einer nicht konstanten Lenkübersetzung i_s kann ein Fahrzeug nach DIN 70000 auch bei einer im Vergleich zum Anstieg des Ackermannwinkels größeren Zunahme des benötigten Lenkwinkels δ_v über der Querbeschleunigung ein übersteuerndes Eigenlenkverhalten aufweisen. Dies ist dann der Fall, wenn sich die Lenkübersetzung i_s mit steigender Querbeschleunigung gleichzeitig so stark reduziert, dass trotz eines Anstiegs von δ_v eine Verminderung des benötigten Lenkradwinkels δ_H auftritt. Da Normalfahrer ihre Erfahrungen im linearen Bereich des Fahrverhaltens sammeln und den Annahmen von z.B. McAdam⁶⁷ oder Müller-Beßler et al.⁶⁸ zufolge in kritischen Fahrsituationen nur ungenügend in der Lage sind, ihre Lenkreaktionen einem veränderten Fahrverhalten anzupassen, werden Fahrzeuge heute über den gesamten Querbeschleunigungsbereich generell stationär untersteuernd ausgelegt. Dies bedeutet, dass der Fahrer für das Erreichen höherer Querbeschleunigungen in jedem Fall stärker Einlenken oder das Fahrzeug Be-

⁶⁶ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 108

⁶⁷ McAdam (1981): Optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, S. 393ff

⁶⁸ Müller-Beßler et al. (2008): Fahrzeugbewertung im doppelten Spurwechsel, S. 358ff

schleunigen muss. Dennoch können Fahrzeuge in instationären Fahrmanövern, z.B. in Bremsmanövern oder Ausweichtests, dynamisch übersteuernd sein.⁶⁹ Dies ist in der eigenen Darstellung aus Bild 2.3 (rechts) am Beispiel eines Lastwechsels bzw. der Bremsung aus einer zunächst stationären Kurvenfahrt ersichtlich: Bei einem Lastwechsel wird die Hinterachse des Fahrzeugs entlastet und die Vorderachse um eine zusätzliche Radaufstandskraft $\Delta F_{z,w}$ belastet. Unter Annahme von radlastabhängigen Schräglaufsteifigkeiten der Reifen, z.B. nach Heißing/Ersoy⁷⁰, benötigt die Hinterachse in Folge der verminderten Radlast einen höheren Schräglaufwinkel, um die bisherige Seitenkraft abstützen zu können. Gleichzeitig gewinnt die Vorderachse durch die zusätzliche Radlast bei zunächst unverändertem Schräglaufwinkel an Seitenkraft. Bei konstantem Lenkradwinkel resultiert infolge des Lastwechsels also ein Giermoment, welches das Fahrzeug zusätzlich in die Kurve eindreht.

$$\Delta M_{Z, \text{Lastwechsel}} = \Delta F_{y,h} \cdot l_h + \Delta F_{y,v} \cdot l_v \quad (2.16)$$

Zusätzlich werden die Aufstandsflächen der Reifen durch die angreifenden Seitenkräfte in Kurvenfahrt nach Kurveninnen verschoben.⁷¹ Eine an beiden Rädern der Antriebsachse identische Antriebskraft wirkt daher in stationärer (angetriebener) Kurvenfahrt zusätzlich stabilisierend. Ein Wegfall der Antriebskräfte bewirkt bei einem Lastwechsel dementsprechend eine weitere destabilisierende Giermomentendifferenz. In der Folge dreht das Fahrzeug bei konstantem Lenkradwinkel in die Kurve ein und erreicht höhere Querschleunigungen. Da der Lenkradwinkel in diesem Testmanöver konstant gehalten wird, entspricht dieses Fahrverhalten nach Bild 2.3 (rechts) einem dynamisch übersteuerndem Fahrverhalten eines stationär untersteuernden Fahrzeugs (Fahrzeug B). Eine zusätzliche Bremsung des Fahrzeugs kann die Fahrzeugreaktion durch eine zusätzliche Radlastdifferenz verstärken, sofern durch radselektive Bremskraftverteilung kein stabilisierendes Giermoment erzeugt wird. Bei starker Bremsung in Kurvenfahrt wird der Reifen zusätzlich durch einen hohen Längsschlupf S_x beaufschlagt. Hierdurch wird bei konstantem Querschlupf S_y das Kraftschlusspotential der Reifen in Querrichtung vermindert.⁷² Je nachdem, welche Fahrzeugachse stärker abgebremst wird, kommt es bei starker Bremsung zu einer Untersteuer- oder Übersteuerverstärkung. Fahrzeug A in Bild 2.3 (rechts) zeigt ein dynamisch untersteuerndes Eigenlenkverhalten, beispielsweise infolge einer „überbremsten“ Vorderachse.

⁶⁹ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 121

⁷⁰ Heißing, Ersoy (2008): Fahrwerkhandbuch, 2. Auflage, S. 59ff

⁷¹ Reimpell, Sponagel (1988): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage, S. 208

⁷² Reimpell, Sponagel (1988): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage, S. 217ff

Die Betrachtung des dynamischen Eigenlenkverhaltens von Fahrzeugen ist für die Bewertung der Fahrsicherheit in besonderem Maße relevant, da nach Rönitz der Anteil des stationären Kurvenfahrens am gesamten Straßenverkehr nur gering ist.⁷³ In Bezug auf kritische Fahrsituationen im Straßenverkehr kommt daher dem dynamischen Eigenlenkverhalten in Brems- und Ausweichtests eine hohe Bedeutung zu, siehe z.B. Rompe/Heißing⁷⁴ und Weiß⁷⁵. Auch in dynamischen Ausweichmanövern ist nach Zomotor ein Übersteuern möglich und das Fahrzeug kann „phasenweise instabil“ werden oder sogar ins Schleudern geraten.⁷⁶ Daher ist für die Betrachtung der Fahrstabilität insbesondere auch das instationäre Lenkverhalten infolge instationärer Lenkanregungen durch den Fahrer zu betrachten.

Die Zusammenhänge des instationären Lenkverhaltens unter Annahme eines linearen Modellverhaltens des Fahrzeugs werden ebenfalls von Zomotor erörtert:⁷⁷ Mit der Laplace-Darstellung $d/dt = s$, d.h. $\dot{\psi}(t) = \psi \cdot s$; $\dot{\beta}(t) = \beta \cdot s$ kann aus (2.5) und (2.6) die Übertragungsfunktion der Giergeschwindigkeit für eine Lenkwinkleingabe des Fahrers abgeleitet werden ($c_{\alpha,i}$ wird mit c_i abgekürzt).

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_v} = \frac{(m_{Fzg} \cdot v \cdot s + c_v + c_h) \cdot c_v \cdot l_v + (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v) \cdot c_v}{\frac{1}{v} \cdot (m_{Fzg} \cdot v^2 + c_v \cdot l_v - c_h \cdot l_h) \cdot (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v) + \left[\Theta_Z \cdot s + \frac{1}{v} \cdot (c_v \cdot l_v^2 + c_h \cdot l_h^2) \right] \cdot (m_{Fzg} \cdot v \cdot s + c_v + c_h)} \quad (2.17)$$

Dieses System stellt nach Zomotor ein System zweiter Ordnung dar, dessen allgemeine Übertragungsfunktion in der Regelungstechnik

$$F(s) = K \cdot \frac{1 + T_Z \cdot s}{s^2 + 2 \cdot \sigma \cdot s + \omega_0^2} \quad (2.18)$$

entspricht. Um eine Aussage über die theoretische Stabilität eines Fahrzeugs treffen zu können, erfolgt eine mathematische Betrachtung der Gierübertragungsfunktion bei periodischer Lenkanregung: Zur Bestimmung der charakteristischen Größen des Einspurmodells bei periodischer Lenkanregung – die Abklingkonstante $\sigma_{\dot{\psi}}$, die ungedämpfte Eigenfrequenz $\omega_{\dot{\psi},0}$ und somit das Gierdämpfungsmaß $D_{\dot{\psi}} = \sigma_{\dot{\psi}} / \omega_{\dot{\psi},0}$ – wird (2.17) entsprechend nach (2.18) umgestellt.

⁷³ Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

⁷⁴ Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, S. 12

⁷⁵ Weiß (1988): Untersuchung und Rekonstruktion von Ausweich- und Fahrspurwechselvorgängen

⁷⁶ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 121

⁷⁷ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 117ff

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_v} = \frac{\overbrace{c_v \cdot c_h \cdot l}^K}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v} \cdot \frac{1 + \overbrace{\frac{m_{Fzg} \cdot v \cdot l_v}{c_h \cdot l}}^{T_Z} \cdot s}{s^2 + \underbrace{\frac{m_{Fzg} \cdot (c_v \cdot l_v^2 + c_h \cdot l_h^2) + \Theta_Z \cdot (c_v + c_h)}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v}}_{2\sigma_\psi} \cdot s + \underbrace{\frac{m_{Fzg} \cdot v^2 \cdot (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v) + c_v \cdot c_h \cdot l^2}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v^2}}_{\omega_{\psi,0}^2}} \quad (2.19)$$

Aus dieser Umstellung sind die Zählerzeitkonstante T_Z , die Abklingkonstante σ_ψ und die ungedämpfte Giereigenfrequenz $\omega_{\psi,0}$ erkennbar

$$T_Z = \frac{m_{Fzg} \cdot v \cdot l_v}{c_h \cdot l} \quad (2.20)$$

$$\sigma_\psi = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_{Fzg} \cdot (c_v \cdot l_v^2 + c_h \cdot l_h^2) + \Theta_Z \cdot (c_v + c_h)}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v} \quad (2.21)$$

$$\omega_{\psi,0}^2 = \frac{m_{Fzg} \cdot v^2 \cdot (c_h \cdot l_h - c_v \cdot l_v) + c_v \cdot c_h \cdot l^2}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v^2} \quad (2.22)$$

und nach Einsetzen des Gierdämpfungsmaßes D_ψ in (2.19) ergibt sich die Gierübertragungsfunktion schließlich zu

$$\frac{\dot{\psi}}{\delta_v} = \frac{c_v \cdot c_h \cdot l}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v \cdot \omega_{\psi,0}^2} \cdot \frac{1 + T_Z \cdot s}{1 + \frac{2 \cdot D_\psi}{\omega_0} \cdot s + \frac{1}{\omega_0^2} \cdot s^2} \quad (2.23)$$

Das Übertragungsverhalten in stationärer Kreisfahrt ist durch den vom Laplace-Operator unabhängigen Term aus (2.23) gegeben:

$$\left(\frac{\dot{\psi}}{\delta_v}\right)_{stat} = \left(\frac{\dot{\psi}}{\delta_H / i_s}\right)_{stat} = \frac{c_v \cdot c_h \cdot l}{\Theta_Z \cdot m_{Fzg} \cdot v \cdot \omega_{\psi,0}^2} \quad (2.24)$$

Bei instationärem Lenkverhalten entscheidet das Vorzeichen des Gierdämpfungsmaßes D_ψ über die Stabilität des durch Lenkeingaben angeregten Fahrzeug-Systems.⁷⁸ Bei positivem Gierdämpfungsmaß D_ψ ist das System stabil, da die Fahrzeugreaktion infolge einer Störung über der Zeit abklingt. Bei negativem Gierdämpfungsmaß ist das Fahrzeug hingegen instabil, da die Eigenbewegungen des Fahrzeugs nach einer Lenkungsanregung zunehmen.

Die ungedämpfte Giereigenfrequenz $\omega_{\psi,0}$ und die gedämpfte Giereigenfrequenz

⁷⁸ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 118

$$\omega_{\psi} = \omega_{\psi,0} \cdot \sqrt{1 - D_{\psi}^2} \quad (2.25)$$

nähern sich mit steigender Fahrgeschwindigkeit nach Bild 2.4 (links) einander an, während die Gierdämpfung D_{ψ} eines anhand des linearen Einspurmodells idealisierten Fahrzeugs mit steigender Fahrgeschwindigkeit abnimmt, siehe Bild 2.4 (rechts). Somit nimmt auch die Stabilität der Gierreaktion des Fahrzeugs bei höheren Fahrgeschwindigkeiten ab.

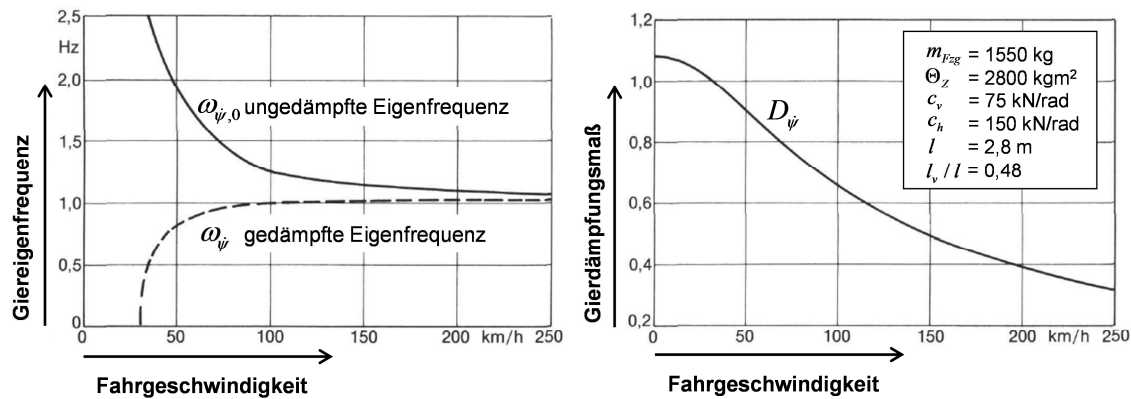


Bild 2.4 Abhängigkeit der Giereigenfrequenzen (links) und des Gierdämpfungsmaßes (rechts) eines linearen Einspurmodells von der Fahrgeschwindigkeit nach Zomotor⁷⁹

Die Gierdämpfung D_{ψ} nimmt negative Werte an, wenn $\omega_{\psi,0}^2$ nach (2.22) ein negatives Vorzeichen annimmt. Durch Einsetzen der Bestimmungsgleichung des Eigenlenkgradienten bei konstanter Lenkübersetzung aus (2.13) in (2.22) ist ersichtlich, dass eine positive Gierdämpfung vorliegt, wenn gilt

$$EG \cdot v^2 + l > 0. \quad (2.26)$$

Ein stationär untersteuernd ausgelegtes Fahrzeug verfügt also grundsätzlich über eine positive Gierdämpfung und ist somit nach der Theorie der Regelungstechnik stabil, während ein stationär übersteuerndes Fahrzeug nur bis hin zu einer kritischen Fahrgeschwindigkeit v_{krit} stabil ist.

$$v_{krit} = \sqrt{-\frac{l}{EG}} \quad (2.27)$$

Ein stationär untersteuernd ausgelegtes Fahrzeug kann, wie bereits erwähnt wurde, jedoch in dynamischen Ausweichtests oder infolge von Lastwechselvorgängen ein temporär übersteuerndes oder sogar instabiles Fahrverhalten aufweisen. Die Ursache ist in beiden Fällen eine Reduzierung der effektiv wirksamen Schräglauftiefenrigidität an der

⁷⁹ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 120

Hinterachse $c_{\alpha,h,dyn,effektiv}$ und / oder eine gleichzeitige Erhöhung der effektiv wirksamen Schräglauftiefen an der Vorderachse $c_{\alpha,v,dyn,effektiv}$. Dies ist nach Umformung von (2.22) wiederum dann der Fall, wenn die effektiv wirksame Schräglauftiefen an der Hinterachse $c_{\alpha,h,dyn,effektiv}$, beispielsweise aufgrund von Lastwechselreaktion, Antriebs-schlupfüberlagerung, Aerodynamik (Entlastung der Hinterachse), Fahrbahnbeschaffenheit (Glätte), Einlaufverhalten des Reifens (Zeitverzug des Kraftaufbaus) oder Achskinematik, temporär kleiner ist als

$$c_{\alpha,h,dyn,effektiv} < \frac{l_v}{\frac{l_h}{c_{v,dyn,effektiv}} + \frac{l^2}{m_{Fzg} \cdot v^2}}. \quad (2.28)$$

Die idealisierten Betrachtungen des linearen Einspurmodells lassen also keinen direkten Rückschluss auf das Fahrverhalten heutiger Fahrzeuge in allen fahrsicherheitsrelevanten Fahrmanövern zu, sie können jedoch dazu verwendet werden, die auftretenden Effekte, beispielsweise infolge Lastwechsels oder hochdynamischer Lenkeingaben, anhand vereinfachter Modellzusammenhänge nachzuvollziehen bzw. zu veranschaulichen.

2.1.3 Messtechnik

Die Möglichkeit zur messtechnischen Erfassung der Bewegungskenngrößen eines Fahrzeugs ist, wie bereits oben diskutiert wurde, die Grundvoraussetzung für eine objektive Betrachtung und Beurteilung des Fahrverhaltens. Nach Zomotor⁸⁰ werden die ersten Messungen des Fahrverhaltens im heutigen Sinne Ende der 30er- / Anfang der 40er-Jahre von Stonex⁸¹ durchgeführt. Hierbei wird der benötigte Lenkradwinkel in stationärer Kreisfahrt über der Querbeschleunigung aufgetragen. Bis heute haben sich die eingesetzten Messmittel einerseits in ihrer Messgenauigkeit, insbesondere aber in ihrer Portabilität weiterentwickelt. Zur messtechnischen Erfassung der Bewegungsgrößen und Lenkeingaben des Fahrers werden heute die Standard-Messinstrumente

- GPS-gestützte Kreiselplattform (Bild 2.5, links)
- Optischer Correvit-Leuchtpunktsensor (Bild 2.5, rechts)
- Messlenkrad (Bild 2.6)

verwendet. Portable Messmethoden werden seit den 60er-Jahren eingesetzt⁸² und waren bis in die 80er-Jahre noch sehr aufwendig, siehe Rompe/Heißing⁸³. Die heutigen, im

⁸⁰ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 14

⁸¹ Stonex (1941): Car Control Factors and their Measurement

⁸² Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁸³ Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, S. 15ff

Vergleich zu den ersten mobilen Messinstrumenten sehr kompakten und einfach zu handhabenden Komponenten, werden fest im bzw. am Fahrzeug montiert. Ein zentraler Messrechner empfängt und speichert alle Messkanäle zeitsynchron in einer Messdatei ab.

GPS-gestützte Kreiselplattform:

Die Kreiselplattform nach Bild 2.5 (links) wird nahe des Fahrzeug-Schwerpunkts fest mit dem Fahrzeug verbunden und ist daher auch als „Strap-Down Plattform“ bekannt. Mit der Kreiselplattform können die Drehraten sowie Beschleunigungen des Fahrzeugs über jeweils drei integrierte Beschleunigungssensoren und Faserkreisel erfasst werden. Die Kreiselplattform wird heute zusätzlich durch GPS-Daten gestützt, um den Anteil der Erdrotation zu kompensieren. Die erfassten Beschleunigungssignale werden unter Verwendung der Drehraten und der aufintegrierten Drehwinkel auf die Fahrbahnebene horizontalisiert. Eine detaillierte Funktionsbeschreibung findet sich bei Zomotor⁸⁴. Mit Differential-GPS-Systemen können zusätzlich Positionsgenauigkeiten des Fahrzeugs im Bereich weniger Zentimeter erzielt werden, siehe Kapitel 4.3.



Bild 2.5 GPS-gestützte Kreiselplattform der Firma iMAR (iTraceRT- F200-E, links) und optischer Leuchtpunkt-Sensor von CORRSYS-DATRON (Correvit S350-Aqua, rechts)

Corrrevit-Sensor:

Correvit-Sensoren sind optische, berührungslose Leuchtpunktsensoren zur Messung der Fahrgeschwindigkeit in Längsrichtung oder – bei der üblicherweise verwendeten mehrachsigen Ausführung – in Längs- und Querrichtung des Fahrzeugs. Zur Messbarkeit der Geschwindigkeiten muss die Fahrbahnoberfläche über eine ausreichende optische Struktur verfügen, siehe Funktionsbeschreibung optischer Gitter von Haus/Lauinger⁸⁵.

⁸⁴ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 237ff

⁸⁵ Haus, Lauinger (2007): Optische Gitter: Die Abbildung der Realität, S. 39ff

Messlenkrad:

Bei Fahrdynamik-Untersuchungen wird nach Armbruster anstelle des Standard-Lenkrads häufig ein „Messlenkrad“ verwendet (Bild 2.6), um eine höhere Auflösung des Lenkradwinkels und des Lenkradmoments im Vergleich zu den fahrzeugeigenen Sensoren zu erzielen.⁸⁶ Das Messlenkrad wird über eine zentrale Bohrung an der Lenksäule befestigt und besteht aus einem frei drehbaren Lenkrad (Rotor) und einem festen Statorgehäuse. Der Lenkradwinkel und das Lenkmoment werden über einen berührungslosen optischen Sensor und DMS-Streifen erfasst.



Bild 2.6 Messlenkrad zur Erfassung von Lenkradwinkel und Lenkradmoment, abgebildet bei Armbruster

Messgenauigkeiten:

Die Messgenauigkeiten der heutigen Messinstrumente zur Erfassung der Bewegungsgrößen von Testfahrzeugen sind nach den jeweiligen Herstellerangaben in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1 Heutige Messgenauigkeiten der Bewegungsgrößen durch die vorgestellten Messinstrumente

Bewegungsgröße	Einheit	Messtechnik	Messgenauigkeit
Fahrgeschwindigkeit	km/h	Optischer Sensor	±0,2 %
Schwimmwinkel	Grad (°)	(z.B. Correvit S350)	±0,2°
Längsbeschleunigung	m/s ²	Strap-Down Plattform (z.B. iTraceRT-F200-E)	±0,0001 m/s ²
Querbearleunigung			±0,2%g
Gierrate	°/s		±0,01°
Gierwinkel	Grad (°)		
Wankwinkel			
Nickwinkel			
Lenkradwinkel	Grad (°)	Messlenkrad	±0,1 %
Lenkmoment	Nm	(z.B. von Corrsys Datron)	±0,2 %

⁸⁶ Armbruster (2006): Fahrdynamikuntersuchung von Fahrspurwechsel mit Längsverzögerung, S. 31

Die vom Hersteller CORRSYS-DATRON angegebenen Messungenauigkeiten eines aktuellen optischen Correvit-Sensors S350-Aqua (0,2 % Linearitätsfehler bezogen auf die Fahrgeschwindigkeit und 0,2° Messungenauigkeit bezogen auf den Schwimmwinkel) sind im Hinblick auf die Ermittlung von objektiven Bewegungskennwerten für das Fahrverhalten vernachlässigbar gering. Gleiches gilt für die geringen absoluten Abweichungen der ermittelten Bewegungsgrößen durch eine Kreiselplattform nach Tabelle 2.1 und die prozentual geringen Linearitätsfehler von 0,1 % bzw. 0,2 % der Messung des Lenkradwinkels und des Lenkmoments durch ein heutiges Messlenkrad.

2.2 Testverfahren und objektive Kennwerte

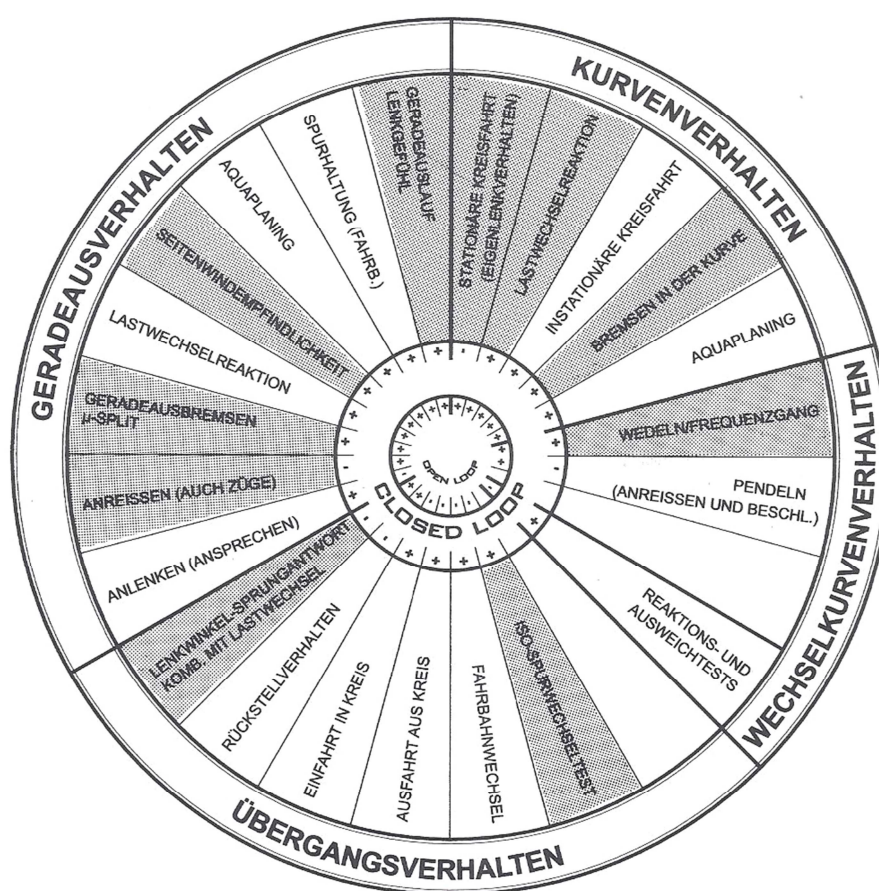


Bild 2.7 Einteilung der wesentlichen Testmanöver im „Fahrdynamikzirkel“ von Zomotor et al.⁸⁷, eingeführt 1978 durch Rönitz⁸⁸

Die zur Beurteilung des Fahrverhaltens im alltäglichen Betrieb von Fahrzeugen relevanten Testverfahren werden in den 70er-Jahren identifiziert und kategorisiert. Bild 2.7 zeigt die Einteilung der relevanten Testverfahren in die Kategorien

⁸⁷ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁸⁸ Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

- Geradeausverhalten
- Übergangsverhalten
- Wechselkurvenverhalten
- Kurvenverhalten

basierend auf Rönitz. In den darauffolgenden Jahren wird die Durchführung und Auswertung des Großteils dieser Testverfahren vereinheitlicht und schrittweise in internationale Normungen überführt, siehe Tabelle 2.2. Das Fahrverhalten in stationärer Kreisfahrt, bei instationärer Lenkanregung (Lenkwinkelsprung, schneller Fahrbahnwechsel, Frequenzgang) und infolge Kurvenbremsung wird zur Definition von Mindestanforderungen an die Fahrstabilität verwendet.⁸⁹ Eine detaillierte Beschreibung der Testverfahren und ihrer objektiven Bewertungskriterien ist in Anhang 8.3 zusammengetragen.

Tabelle 2.2 Aktueller Stand der genormten Testverfahren, in Ergänzung von Sagan⁹⁰

Kategorie	Testverfahren	Norm	Jahr	Open Loop	Closed Loop
Geradeausverhalten	Bremsen auf μ -split	ISO 14512	1999	x	x
	Gespannstabilität	ISO 9815	1992	x	-
	Seitenwind (Gebläse)	ISO 12021-1	1996	x	-
Übergangsverhalten	Dreieckimpuls	ISO 7401	1988	x	-
	ISO Spurwechsel	ISO 3888-1	1999	-	x
	Lenkwinkelsprung	ISO 7401	1988	x	-
Wechselkurvenverhalten	Frequenzgang	ISO 7401	1988	x	-
	Lenkungspendeln	ISO 17288-1	2002	x	-
	VDA Test	ISO 3888-2	2002	-	x
	Weavetest	ISO 13674-1	2003	x	-
	NHTSA Sine with dwell	FMVSS 126	2007	x	-
Kurvenverhalten	Bremsen in der Kurve	ISO 7975	1985	x	-
	Gaswegnahme in der Kurve	ISO 9816	1993	x	-
	Stationäre Kreisfahrt	ISO 4138	1982	x	-

Bei der Durchführung der Testverfahren wird in

- *Open-Loop*- und
- und *Closed-Loop*-

Verfahren unterschieden, siehe z.B. Neukum⁹¹, Plöchl/Edelmann⁹² oder Zomotor et al⁹³. In sogenannten Closed-Loop-Testverfahren wird der vollständige Regekreis aus Fahrer, Fahrzeug und Umwelt betrachtet. Der Vorteil von Closed-Loop-Verfahren besteht darin, den Fahrer direkt miteinzubeziehen und somit reale Fahrsituationen nachstellen zu kön-

⁸⁹ von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 13

⁹⁰ Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 20

⁹¹ Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop

⁹² Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 699ff

⁹³ Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

nen.⁹⁴ Als Nachteil werden nach Neukum die eingeschränkte Reproduzierbarkeit von Closed-Loop-Verfahren und die Abhängigkeit der Testergebnisse von individuellen Fertigkeiten, Fahrstrategien und Subjektivurteilen betrachtet.⁹⁵ In Open-Loop-Verfahren wird der Einfluss des Fahrers nicht berücksichtigt, um eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit bei der messtechnischen Erfassung des Fahrverhaltens zu erzielen. In Abhängigkeit des Testverfahrens wird das Lenkrad entweder fixiert (fixed control), frei gelassen (free control) oder ein bestimmter Lenkradwinkelverlauf vorgegeben, wie z.B. in den durch die amerikanische Verkehrssicherheitsbehörde NHTSA definierten Testmanövern „Fishhook“ und „Sine with dwell“.⁹⁶ Durch die Ausblendung des Fahrereinflusses wird das Fahrverhalten im offenen Regelkreis jedoch auf den Teilaspekt des isolierten Fahrzeugverhaltens reduziert. In diesem Fall müssen also die in dieser Arbeit untersuchten objektiven (messbaren) Beurteilungskriterien für das Fahrzeugverhalten vorliegen.

Das Ziel der Standardisierung von Testverfahren seit den 70er-Jahren ist daher neben der Entwicklung einer einheitlichen Prüfmethodik durch die Fahrzeughersteller auch der Versuch, die Bewertung des Fahrverhaltens von der Subjektivbeurteilung einzelner Testfahrer zu lösen und zu objektivieren, siehe Förster⁹⁷ oder Jürgensohn⁹⁸. Der Ansatz hierzu besteht in der bereits genannten Suche nach signifikanten Korrelationen zwischen Subjektivbeurteilungen und objektiven Bewegungskennwerten, siehe auch Neukum⁹⁹, Bruder et al.¹⁰⁰ oder Tuzar¹⁰¹. Diese Zielsetzung erklärt, warum der Schwerpunkt der heutigen Prüfverfahren nach Plöchl/Edelmann¹⁰² und Tabelle 2.2 auf Open-Loop-Untersuchungen unter Ausschluss des Fahrereinflusses liegt. Da der Fahrer und seine Handlungen jedoch ein wesentlicher Bestandteil des gesamten Regelkreises sind, fordern heute neben Neukum¹⁰³ auch Jürgensohn¹⁰⁴, Sagan¹⁰⁵ und Zomotor et al.¹⁰⁶ eine verstärkte Betrachtung von Closed-Loop-Verfahren zur Bewertung des Fahrverhaltens. Nach Sagan ist eine umfassende Bewertung des objektiven Fahrverhaltens auf Basis der bestehenden Open-Loop-Verfahren nicht möglich und sollte um Verfahren ergänzt wer-

⁹⁴ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 220

⁹⁵ Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop, S. 4

⁹⁶ Forkenbrock (2005): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program

⁹⁷ Förster (1987): Menschliches Verhalten, eine vergessene Ingenieur-Wissenschaft

⁹⁸ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 13

⁹⁹ Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop, S. 1ff

¹⁰⁰ Bruder et al (2009): Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens

¹⁰¹ Tuzar (2007): Einfluss von Fahrversuchen auf das Human-Machine-Interaction-Design in Fahrzeugen

¹⁰² Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 699ff

¹⁰³ Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop

¹⁰⁴ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 31f

¹⁰⁵ Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 17ff

¹⁰⁶ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

den, die den Fahrer mit einbeziehen.¹⁰⁷ Ebenso umstritten ist die Objektivierung des Fahrverhaltens durch Korrelation mit positiven Subjektivurteilen: Jürgensohn sieht den Ansatz der Korrelationsuntersuchungen in Teilen als gescheitert an, da aus statistischen Betrachtungen keine Kausalität abgeleitet werden könne.¹⁰⁸ Seine Aussage stützt Jürgensohn auf widersprüchliche Ergebnisse von bekannten Korrelationsuntersuchungen zu Ausweichtests. Auch Meyer-Tuve/Heißing zweifeln die Ergebnisse von Korrelationsuntersuchungen mit dem Argument an, die gefundenen Zusammenhänge seien individuell und würden zudem mit der Weiterentwicklung der Fahrzeuge veralten.¹⁰⁹ Andere Autoren betonen hingegen die bisherigen Forschungserfolge: So sieht Sagan viele Bewegungskenngrößen erst dann als bewertbar an, wenn positive Korrelationszusammenhänge zu Subjektivurteilen nachgewiesen werden.¹¹⁰ Auch Zomotor et al.¹¹¹ widersprechen Jürgensohn in einer umfangreichen Zusammenfassung von Prüfverfahren und beurteilen die bisherigen Erkenntnisse als vielversprechend. Zwar bestehe eine Lücke zwischen der Bewertung des Fahrverhaltens durch Open-Loop-Kennwerte und dem geschlossenen Regelkreis, diese sei aber durch die Kenntnis weiterer relevanter Kriterien zu schließen. Ähnlich wie Jürgensohn¹¹² sehen Zomotor et al. dabei die Betrachtung des geschlossenen Regelkreises und die Verwendung von geeigneten Fahrermodellen zur Nachbildung des menschlichen Regelverhaltens als notwendig an.¹¹³ Der folgende Abschnitt geht daher auf bisher bekannte Untersuchungen zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen für das Fahrzeugverhalten auf Basis von subjektiven Beurteilungen durch Normalfahrer im geschlossenen Regelkreis ein.

2.2.1 Closed-Loop-Studien zur Ermittlung von Akzeptanzgrenzen

Bekannte Aussagen zu subjektiven Akzeptanzgrenzen für Abweichungen des Fahrzustandes von einem stationären Ausgangsfahrzustand resultieren aus Untersuchungen von Lenksystemstörungen. Neukum/Krüger¹¹⁴ kritisieren im Vorfeld der durchgeführten Untersuchungen, dass eine Bewertung verschiedener Fahrzeuge untereinander in der Regel nur relativ zueinander und nicht absolut erfolge. Daher könne keine absolute Aussage über Akzeptanzgrenzen getroffen werden. Sie stellen daher eine klassifizierte Subjektiv-Skala vor, die einen direkten Rückschluss auf eine mögliche subjektive Gefährdungsgrenze zulässt, siehe Bild 2.8.

¹⁰⁷ Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 28f

¹⁰⁸ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 14

¹⁰⁹ Meyer-Tuve, Heißing (2007): Ermittlung quantifizierbarer Bewertungen zur Querdynamik

¹¹⁰ Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 24

¹¹¹ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

¹¹² Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 31f

¹¹³ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

¹¹⁴ Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 302ff

Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar	10
	9
Gefährlichkeit	8
	7
	6
Störung des Fahrens	5
	4
	3
Spürbarkeit	2
	1
nichts bemerkt	0

Bild 2.8 Skala zur Störungsbewertung (SSB) nach Neukum/Krüger¹¹⁵

Diese Störbewertungsskala enthält eine Klassifizierung der subjektiven Beurteilung in fünf Kategorien, wobei die Kategorien „Spürbarkeit“, „Störung des Fahrens“ und „Gefährlichkeit“ von den befragten Testpersonen jeweils in drei Feinbewertungsschritte differenziert werden können. Insgesamt ergibt sich eine 11-stufige Skala mit klar ersichtlicher Trennung zwischen einer empfundenen Störung des Fahrens (4-6) und der Bewertung als „sicherheitskritische Situation“ (7-10). Die Störbewertungsskala erzielt nach Neukum/Krüger eine hohe Skalenakzeptanz und wird zur Bewertung von Störungen eines stationären Ausgangsfahrzustandes durch Überlagerungslenkung AFS (Active Front Steering)¹¹⁶, Aufschaltung von fehlerhaften Zusatzlenkmomenten durch eine EPS (Electric Power Steering)^{117,118,119}, Aufschaltung von Störlenkwinkeln an der Hinterachse¹²⁰ und durch Vertikaldynamikstörung in Kurvenfahrt¹²¹ verwendet.

Zur Ermittlung von Akzeptanzgrenzen der Fahrzeugreaktion bei Störung durch eine Überlagerungslenkung (AFS) werden in Geradeausfahrt mit 50/100/150 km/h und bei einer Fahrbahnbreite von 3 m verschieden starke Lenkwinkelfehler aufgeschaltet.¹²² Die subjektive Beurteilung der Störungen durch Normalfahrer wird anschließend u.a. den objektiven Kenngrößen der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ und der maximalen Querbeschleunigungsabweichung $\Delta a_{y,\max}$ gegenübergestellt, siehe Definition

¹¹⁵ Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 303

¹¹⁶ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures

¹¹⁷ Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

¹¹⁸ Neukum (2010): Controllability of erroneous steering torque interventions

¹¹⁹ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

¹²⁰ Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung

¹²¹ Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug- Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen

¹²² Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failure, S. 4ff

der Kenngrößen in Kapitel 2.2.2. Anhand des 85-%-Quantils der Störbewertungen werden geschwindigkeitsabhängige Akzeptanzgrenzen für $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ und $\Delta a_{y,\max}$ abgeleitet:¹²³

- 50 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 4,0^\circ/\text{s}$, $\Delta a_{y,\max} = 1,25 \text{ m/s}^2$
- 100 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 3,0^\circ/\text{s}$, $\Delta a_{y,\max} = 1,25 \text{ m/s}^2$
- 150 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 2,5^\circ/\text{s}$, $\Delta a_{y,\max} = 1,25 \text{ m/s}^2$

Dies bedeutet, mindestens 15 % der Testpersonen beurteilen die angegebenen Gierstörungenbeträge und Querschleunigungen als gefährlich. Wesp untersucht 2011 die Subjektivbeurteilungen von Hinterradlenkeingriffen nach identischem Muster und nennt auf Basis des 85 %-Quantils folgende Akzeptanzgrenzen:¹²⁴

- 100 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 12,0^\circ/\text{s}$, $\Delta a_{y,\max} = 2,8 \text{ m/s}^2$
- 150 km/h: $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 7,8^\circ/\text{s}$, $\Delta a_{y,\max} = 3,0 \text{ m/s}^2$

Diese von Wesp genannten Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen und Querschleunigungen durch Hinterradlenkeingriffe liegen deutlich oberhalb der Empfehlungen von Neukum et al. für Lenksystemstörungen an der Vorderachse. Die maximale Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ korreliert bei Störungen des Lenksystems nach Neukum et al.¹²⁵ zwar am besten mit der Subjektivbeurteilung von Normalfahrern, die Fahrerurteile sind bei variierter Fahrgeschwindigkeit jedoch über der auftretenden Querschleunigungsabweichung annähernd konstant.¹²⁶

Bild 2.9 vergleicht die subjektive Störbewertung von Gierstörungen durch AFS und EPS in Geradeausfahrt bei 100 km/h (links) und durch Störung der Vertikaldynamik in Kurvenfahrt bei 50-70 km/h mit variierter Ausgangsquerbeschleunigung (rechts). Nach Bild 2.9 (links) ist die Störbeurteilung von Gierstörungen durch AFS und EPS bei gleicher Fahrgeschwindigkeit nicht signifikant verschieden. Die Störbeurteilung von Lenksystemstörungen an der Vorderachse fällt bei vergleichbaren Gierstörungen nach Bild 2.9 (rechts) jedoch deutlich kritischer aus als die Beurteilung von Vertikaldynamikstörungen (ca. um den Faktor 2 bei identischen Gierstörungen). Die durch aktive Vertikaldynamikverstellung an der Hinterachse verursachten Gierstörungen werden erst oberhalb von $8^\circ/\text{s}$ teilweise als gefährlich eingestuft.¹²⁷

¹²³ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 10f

¹²⁴ Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

¹²⁵ Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

¹²⁶ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures

¹²⁷ Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, S. 92

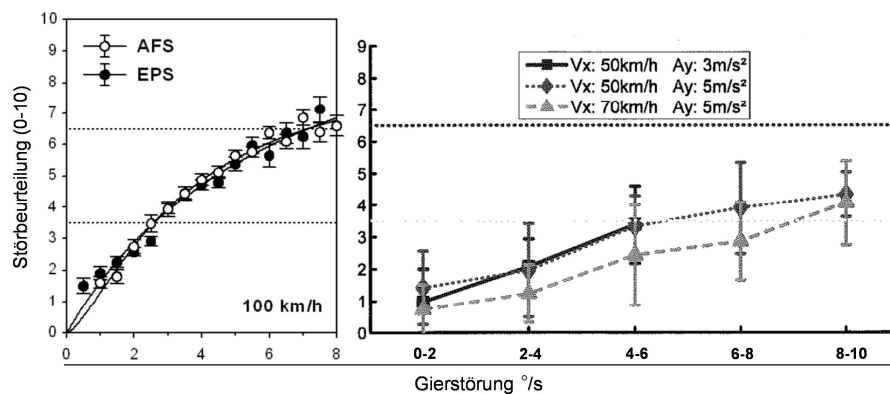


Bild 2.9 Bewertungen von Gierstörungen durch Lenksystemstörungen (links)¹²⁸ und durch Vertikaldynamikstörung in Kurvenfahrt (rechts)¹²⁹ auf Basis der Störbewertungsskala

Ein möglicher Erklärungsansatz für die deutliche Abweichung der Störbeurteilung zwischen Lenksystemstörungen an der Vorderachse und Störungen durch Hinterradlenkeingriffe oder Vertikaldynamikstörungen ist die reflexgeschuldete Reaktion von Fahrern auf spürbare Störungen in der Lenkung.¹³⁰ Nach Krüger resultiert bei Lenksystemstörungen an der Vorderachse nach etwa 70 ms eine typische, der ursprünglichen Störung entgegen gerichtete Lenkmomentenspitze, die aus einem Eigenreflex der Haltemuskulatur resultiert.¹³¹ Dieser initiale Reflex führt nach Wallentowitz et al. wiederum zu einer überhöhten Lenkkorrektur durch den Fahrer und somit zu einem erhöhten Spurbreitenbedarf in der Kompensationsphase.¹³² Die Reaktionszeit auf nicht in der Lenkung spürbare Kursstörungen wird von Krüger hingegen lediglich zwischen 0,8-1 Sekunden angenommen.

Neben den verwendeten Bewegungskennwerten wie der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ oder der maximalen Querbeschleunigungsdifferenz $\Delta a_{y,\max}$ wurde in den Closed-Loop-Studien von Wallentowitz et al. und Freitag et al.¹³³ auch das konkrete Kurshaltevermögen der Testpersonen betrachtet. Wallentowitz et al. ermitteln den sogenannten *Spurbreitenbedarf SBB* in Abhängigkeit der aufgeschalteten Lenkmomentenstörungen und unterscheiden dabei den primären Spurbreitenbedarf und den sekundären Spurbreitenbedarf. Der *Primärspurbbedarf* ist die maximale Querabweichung des Fahrzeugs in Richtung der eigentlichen Fehleraufschaltung. Der *Sekundärspurbbedarf* resultiert aus der anschließenden Kompensationsreaktion des Fahrers in die Gegen-

¹²⁸ Neukum (2010): Controllability of erroneous steering torque interventions, S. 374

¹²⁹ Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug- Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, S. 80

¹³⁰ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

¹³¹ Krüger (2000): Wenn intelligente Systeme intelligente Fahrer unterstützen, S. 1331ff

¹³² Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

¹³³ Freitag et al. (2001): Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen

richtung. In den Untersuchungen zu Lenksystemstörungen an der Vorderachse wurde im Vergleich zu dem Primärspurbedarf ein durchgängig höherer Sekundärspurbedarf beobachtet.¹³⁴ In Kurvenfahrt besteht nach der genannten Studie von Wallentowitz et al. zudem auch ohne Störaufschaltung ein generell erhöhter Spurbedarf, so dass die aufgeschalteten Lenksystemstörungen keine weitere Erhöhung des Spurbreitenbedarfs zur Folge haben. Über einen Auswertzeitraum von vier Sekunden nach Störaufschaltung werden folgende mittlere Spurbreitenbedarfe genannt:

- Ungestörte Geradeausfahrt: 0,16 m
- Geradeausfahrt mit maximaler untersuchter Lenksystemstörung: 0,33 m
- Natürlicher Seitenwind: 0,28 m

Der Spurbreitenbedarf infolge natürlichen Seitenwinds wird hierbei offenbar als Referenzkriterium für eine beherrschbare Lenksystemstörung verwendet. Eine konkrete Akzeptanzgrenze für den maximal tolerierbaren Spurbreitenbedarf wird nicht genannt.

Freitag et al. untersuchen die Auswirkung von Lenksystemstörungen an der Vorderachse (Übersetzungs- und Lenkwinkelsprünge) auf das Kursführungsvermögen von Normalfahrern in den Testmanövern Geradeausfahrt, Handlingparcours, Slalom und ISO-Spurwechsel. Dabei wird konkret auf die Kursführungsaufgabe des Fahrers verwiesen und als Kriterium ein Verlassen der ursprünglichen Fahrspur von 0,2 m und 0,4 m verwendet. Auf Basis der Ergebnisse wird eine Beschränkung des untersuchten, maximal tolerierbaren Lenkwinkelsprungs durch autonomes Falschlenken eines Lenksystems an der Vorderachse von $0,35^\circ$ bei 100 km/h und von $0,2^\circ$ bei 150 km/h gefordert. Die zugehörige sprungartige Änderung der Lenkübersetzung sollte der Studie nach einen Wert von $\Delta i_s = 3$ nicht überschreiten.¹³⁵

In der Beurteilung von geeigneten Kriterien zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen sehen Neukum/Krüger die Subjektivbeurteilung als das wesentliche Kriterium an: Die Erfüllung der Fahraufgabe, sprich die Fähigkeit zur Kurshaltung, wird zwar als notwendiges, aber nicht als hinreichendes Kriterium betrachtet.¹³⁶ Tuzar fordert 2007 hingegen eine verstärkte Tendenz zur objektiven Leistungsindikation im Zusammenspiel zwischen Mensch und Fahrzeug.¹³⁷

¹³⁴ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

¹³⁵ Freitag et al. (2001): Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen

¹³⁶ Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 299

¹³⁷ Tuzar (2007): Einfluss von Fahrversuchen auf das Human-Machine-Interaction-Design in Fahrzeugen

2.2.2 Bewegungskennwerte zur Bewertung der Fahrsicherheit

Die Zusammenfassung der Testverfahren und Forschungsergebnisse aus Anhang 8.3 weist eine Vielzahl an bekannten und offenbar geeigneten Kennwerten zur Beurteilung des subjektiven Fahrverhaltens nach. Nicht alle dieser Kennwerte stehen jedoch in einem direkten Zusammenhang mit der Beurteilung der Stabilität bzw. der Fahrsicherheit, sondern bilden teilweise lediglich subjektive Gefallensurteile der Fahreigenschaften ab, wie z.B. der KD-Wert im ISO-Spurwechsel.¹³⁸ Tabelle 2.3 (oben) zeigt eine Übersicht derjenigen Testverfahren und Kennwerte, die der Literatur zufolge eine gute Eignung dafür besitzen, die subjektive Fahrsicherheit in den bekannten Testmanövern zu objektivieren. Dabei bestätigen sich die Aussagen von Rönitz bzw. auch Wallentowitz et al., wonach das Gierverhalten und die auftretenden Schwimmwinkel in fast allen stationären und instationären Manövern dazu geeignet erscheinen, die Fahrsicherheit bzw. die Stabilität des Fahrzeugverhaltens zu bewerten.^{139,140} In Tabelle 2.3 (unten) sind die gängigsten und in dieser Arbeit verwendeten Kennwerte zur Beschreibung der Fahrsicherheit in Brems- und Ausweichtests definiert.

Die Übersicht aus Tabelle 2.3 zeigt, dass in den hervorgehobenen Bremsmanövern stets die Giergeschwindigkeits- oder Querschleunigungsabweichung (Maximalwerte oder Ein-Sekunden-Werte) $\dot{\psi}_{1s/\max}$; $\Delta a_{y,1s/\max}$ als besonders geeignet zur Beschreibung der Fahrsicherheit betrachtet werden.^{141,142,143,144,145,146,147,148,149,150,151,152,153,154,155} Zur Beurteilung der Stabilität in Kurvenbremsung oder in stationärer Kreisfahrt wird zusätzlich der Schwimmwinkel $\beta_{SP,1s/\max}$ betrachtet.^{156,157,158}

¹³⁸ Dibbern (1992): Ermittlung eines Kennwertes für den ISO-Fahrspurwechsel

¹³⁹ Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

¹⁴⁰ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

¹⁴¹ Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

¹⁴² Ehlich et al. (1983): Fahrverhalten von PKW bei Einsatz von Noträdern

¹⁴³ Grunow et al. (1983): Testverfahren für PKW mit automatischen Blockierverhinderern

¹⁴⁴ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

¹⁴⁵ ISO 14512 (1999): Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction

¹⁴⁶ Kuralay (1986): Einfluss von Fahrwerkselastizitäten und Reifenparametern auf das Fahrverhalten

¹⁴⁷ Rompe (1982): Möglichkeiten und Grenzen objektiver Fahrverhaltens-Tests

¹⁴⁸ Rompe (1978): Testverfahren für das Bremsen in der Kurve

¹⁴⁹ Rompe, Donges (1983): Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger PKW

¹⁵⁰ Rompe, Grunow (1980): Fahrverhalten von PKW beim Bremsen in der Kurve auf nassen Fahrbahnen

¹⁵¹ Rompe, Heißing (1984): Möglichkeiten zur Bewertung der Fahreigenschaften

¹⁵² Zomotor (1978): Meßverfahren bei der Auslegung des Fahrverhaltens

¹⁵³ Zomotor et al. (1980): Bremsen in der Kurve - Untersuchung eines Testverfahrens

¹⁵⁴ Zomotor, Kuhn (1982): Verbesserung der Aktiven Sicherheit von Personenwagen-Caravan-Zügen

¹⁵⁵ Zomotor et al. (1982): Stabilität und aerodynamisches Störverhalten von PKW-Wohnanhängerzügen

¹⁵⁶ Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße

¹⁵⁷ Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

¹⁵⁸ Zomotor et al. (1980): Bremsen in der Kurve - Untersuchung eines Testverfahrens

Tabelle 2.3 Übersicht und Definition der Kennwerte zur Beurteilung der Fahrsicherheit in den relevanten Testverfahren, u.a. basierend auf der umfangreichen Recherche von Dietrich¹⁵⁹

Kategorie	Testverfahren	Relevante Fahrsicherheits-Kennwerte
Geradeausverhalten	Bremsen auf μ -split	$\Delta\dot{\psi}_{1s}; \bar{a}_{y,1s}; \Delta y$
	Geradeausbremsung	$\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}; a_{y,1s/\max}$ + benötigte Lenkaktivität
	Seitenwind (Gebläse)	$\Delta\dot{\psi}_{\max}$ + kombinierte Kennwerte aus $\dot{\psi}; \ddot{\psi}; a_y$
Übergangsverhalten	Dreieckimpuls	$a_{y,\max}; \int \beta_{SP}; \beta_{SP,\max}$
	ISO Spurwechsel	$\beta_{SP}; \bar{v}_{FzG}; T_{\dot{\psi}/a_y}; \phi_{\dot{\psi}/a_y}$ + Kippsicherheit (Two Wheel Lift)
	Lenkwinkelsprung	$U_{\dot{\psi}; a_y}; T_{\dot{\psi}; a_y}$
Wechselkurvenverhalten	Frequenzgang	$D_{\dot{\psi}}; T_Z; \omega$
	Giervverstärkung (f= 0,2 Hz)	$\dot{\psi}_{stat} / \delta_{H,stat}$ (Giervverstärkungsfaktor GV)
	Lenkungspendeln	$\left(\frac{(\beta_{SP}; \dot{\psi}; \delta_H)_{\max,1}}{(\beta_{SP}; \dot{\psi}; \delta_H)_{\max,2}}; (\beta_{SP}; \dot{\psi}; \delta_H)_{\max,2}; t_{a_{y,\max,1}}; t_{\delta_{H,\max,1}} \right) = f(a_{y,0})$
	Slalom Test	Kippsicherheit (Two Wheel Lift)
	VDA Test / Elchtest	siehe ISO-Spurwechsel
	Weavetest	- (kein Bezug zur Beurteilung der Fahrsicherheit)
	ADAC Ausweichtest	- (nur subjektive Beurteilung der Schleuderstabilität)
	NHTSA Fishhook	Kippsicherheit (Two Wheel Lift)
	NHTSA Sine with dwell	$\Delta\dot{\psi}_{\max}; \frac{\dot{\psi}(t_o + 1s)}{\dot{\psi}_{\max}}; \frac{\dot{\psi}(t_o + 1,75s)}{\dot{\psi}_{\max}}; \Delta y$
Kurvenverhalten	Bremsen in der Kurve	$\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}; \dot{\psi}_{\max} / \dot{\psi}_{ref}; \Delta a_{y,1s}; \beta_{SP,1s/\max}$
	Gaswegnahme in der Kurve	siehe Bremsen in der Kurve
	Instationäre Kreisfahrt	$\Delta\dot{\psi}_{1s}$
	Stationäre Kreisfahrt	$EG; SG; \beta_{SP}$
Fahrsicherheits-Kennwert		Definition
$\Delta\dot{\psi}_{1s}$		Differenz der Giergeschwindigkeit zu ihrem stationären Ausgangswert genau eine Sekunde nach Unterbrechung der stationären Geradeaus- oder Kurvenfahrt (z.B. durch Bremsvorgänge, Lastwechsel oder Lenksystemstörungen).
$\Delta\dot{\psi}_{\max}$		Maximale Differenz der Giergeschwindigkeit zu ihrem stationären Ausgangswert infolge einer Unterbrechung der stationären Geradeaus- oder Kurvenfahrt.
$\Delta\dot{\psi}_{ref,1s} = \dot{\psi}(1s) - \frac{v_x(1s)}{R_0}$		Differenz der Giergeschwindigkeit zur aktuellen Referenzgierrate $\dot{\psi}_{ref}$ (s.u.) genau eine Sekunde nach Unterbrechung der stationären Kreisfahrt.
$\Delta\dot{\psi}_{ref,\max} = \max \left[\dot{\psi}(t) - \frac{v_x(t)}{R_0} \right]$		Maximale Differenz der Giergeschwindigkeit zur aktuellen Referenzgierrate $\dot{\psi}_{ref}$ infolge einer Unterbrechung der stationären Kreisfahrt.
$\dot{\psi}_{ref} = \frac{v_x(t)}{R_0}$		Theoretische Giergeschwindigkeit, die bei aktueller Fahrgeschwindigkeit mindestens benötigt wird, um weiterhin den Ausgangsradius R_0 zu befahren.
$\Delta a_{y,1s}$		Differenz der Querbeschleunigung zu ihrem stationären Ausgangswert genau eine Sekunde nach Unterbrechung der stationären Geradeaus- oder Kurvenfahrt.
$\Delta a_{y,\max}$		Maximale Differenz der Querbeschleunigung zu ihrem stationären Ausgangswert infolge einer Unterbrechung der stationären Geradeaus- oder Kurvenfahrt.
$\beta_{SP,1s}$		Schwimmwinkel im Fahrzeug-Schwerpunkt genau eine Sekunde nach Unterbrechung des stationären Ausgangszustands (z.B. Kurvenbremsen).
$\beta_{SP,\max}$		Maximalwert des Schwimmwinkels im Fahrzeug-Schwerpunkt während des betrachteten Fahrmanövers (Brems- oder Ausweichmanöver).
$\beta_{HA,1s}$		Schwimmwinkel an der Hinterachse genau eine Sekunde nach Unterbrechung des stationären Ausgangszustands (z.B. Kurvenbremsen).
$\beta_{HA,\max}$		Maximalwert des Schwimmwinkels an der Hinterachse während des betrachteten Fahrmanövers (Brems- oder Ausweichmanöver).

¹⁵⁹ Dietrich (2009): Entwicklung eines Versuchskonzepts zur Bewertung von Stabilisierungsfähigkeiten, S. 24ff

Darüber hinaus werden jedoch auch die Querabweichung Δy in μ -split Bremsung¹⁶⁰ und die benötigte Lenkaktivität in Geradeausbremsung^{161,162,163} als geeignete Kriterien zur Objektivierung beschrieben.

In Spurwechseltests und Ausweichmanövern (ISO-Spurwechsel, VDA-Ausweichtest, NHTSA Sine with dwell) gilt ebenfalls der Schwimmwinkel $\beta_{SP,max}$ ^{164,165,166,167} bzw. eine hohe Gierwinkelabweichung $\Delta\psi_{max}$ ¹⁶⁸ zur Fahrtrichtung als Kriterium für die Stabilität des Fahrzeugverhaltens. Die Verwendung weiterer Kennwerte macht jedoch auch deutlich, dass die Stabilität des Fahrzeugs nicht als ausreichendes Kriterium für eine hohe Fahrsicherheit in Ausweichtests angesehen wird: Das querdynamische Ansprechverhalten, objektiviert durch möglichst geringe Ansprechzeiten $T_{\dot{\psi}/a_y}$, geringe Phasenverzögerungen $\phi_{\dot{\psi}/a_y}$ von Gierrate und Querschleunigung^{169,170} oder durch einen geforderten Mindest-Querversatz Δy ^{171,172} wird ebenfalls als wichtiger Bestandteil eines sicheren Fahrverhaltens angesehen.

Auch in Open-Loop-Tests mit synthetischen Lenkeingaben (Dreieckimpuls, Lenkwinkelsprung) wird der Zielkonflikt zwischen der bewerteten Stabilität (möglichst niedrige maximale Schwimmwinkel β_{SP} und Schwimmwinkelintegrale $\int \beta_{SP}$ bzw. geringe Überschwingweiten von Gierrate und Querschleunigung $U_{\dot{\psi}/a_y}$) und einer ausreichenden querdynamischen Performance (möglichst hohe Querschleunigung $a_{y,max}$ bzw. niedrige Ansprechzeiten $T_{\dot{\psi}/a_y}$) thematisiert.^{173,174} In allen Testverfahren mit hoher wechselseitiger Querdynamikbeanspruchung (ISO-Spurwechsel, Slalom-Test, VDA-Test/Elchtest, NHTSA Fishhook, NHTSA Sine with dwell) wird zusätzlich die Kippsicherheit des

¹⁶⁰ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

¹⁶¹ Grunow et al. (1983): Testverfahren für PKW mit automatischen Blockierverhinderern

¹⁶² Lorenz et al. (1986): Einfluß des Sperrdifferentials auf Traktion und Fahrverhalten

¹⁶³ Rompe, Ehlich (1987): Stand der objektiven Bewertung von Reifen- und Fahrwerkseigenschaften

¹⁶⁴ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

¹⁶⁵ Lincke et al. (1973): Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling Performance

¹⁶⁶ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

¹⁶⁷ Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

¹⁶⁸ Uffelmann (1981): Lastwechselreaktion des frontgetriebenen PKW bei Kurvenfahrt

¹⁶⁹ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

¹⁷⁰ Lincke et al. (1973): Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling Performance

¹⁷¹ Forkenbrock (2005): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program

¹⁷² NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-8

¹⁷³ Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme

¹⁷⁴ Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

Testfahrzeugs durch das unerwünschte Auftreten eines Radabhebens von mehr als zwei Rädern (Two Wheel Lift) bewertet.^{175,176,177}

2.2.3 Bekannte Akzeptanzgrenzen für die Bewegungskennwerte

Das Fahrverhalten wird heute also in zahlreichen Tests überprüft und durch objektive Bewegungskenngrößen charakterisiert. Eine Entscheidung, ob das Fahrzeug ein sicheres Fahrverhalten aufweist, kann jedoch wie eingangs erwähnt nur auf Basis von Akzeptanzgrenzen für die relevanten Bewegungskennwerte aus Tabelle 2.3 getroffen werden. Tabelle 2.4 fasst daher alle bekannten bzw. veröffentlichten Akzeptanzgrenzen für die zur Beschreibung der Fahrsicherheit in der Literatur als wesentlich erachtete Kenngrößen der Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta\dot{\psi}$ und des Schwimmwinkels im Fzg.-Schwerpunkt β_{sp} zusammen. In Kurvenbremsung ist nach Fiat eine maximale Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ von 50 % im Vergleich zur Ausgangsgierrate $\dot{\psi}_{ref}$ bei Bremsbeginn tolerierbar.¹⁷⁸ Im Lastwechselfall stellt eine Gierbeschleunigung $\ddot{\psi}$ größer $5^\circ/\text{s}^2$ nach Otto eine Gefährlichkeitsgrenze dar.¹⁷⁹ Der Schwimmwinkel β_{sp} sollte in Kurvenbremsung nach einer schwedischen Fahrsicherheitsstudie¹⁸⁰ aus dem Jahr 1974 maximal 20° betragen und nach Rompe et al.¹⁸¹ 1980 eine Sekunde nach Bremsbeginn maximal 15° . Auch Witte sieht 1995 Schwimmwinkel im Schwerpunkt des Fahrzeugs bis 20° als unkritisch aus Fahrersicht an.¹⁸² Konstante Schwimmwinkel bis 4° können 1989 nach Kudritzki zudem vom Fahrer nicht wahrgenommen werden.¹⁸³ Demgegenüber stehen Veröffentlichungen aus der jüngeren Vergangenheit, die geringere Akzeptanzgrenzen für Schwimmwinkel vermuten lassen: Nach Jürgensohn (1997) werden bereits Schwimmwinkel β_{sp} ab 4° im „Normalfahrbereich“ als unangenehm eingestuft.¹⁸⁴ Keinert¹⁸⁵ nennt 2004 im Rahmen einer Forschungsarbeit eine Akzeptanzgrenze von 5° Schwimmwinkel bei Impulsenkung, während 5° Schwimmwinkel für von Glasner¹⁸⁶ 2009 noch nicht als kritisch zu beurteilen sind. Ein kritisches Fahrverhalten beginnt nach von Glasner erst ab 10° Schwimmwinkel.

¹⁷⁵ Forkenbrock (2005): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program

¹⁷⁶ Forkenbrock (2008): Test Track Evaluation of Electronic Rollover Mitigation Technology

¹⁷⁷ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

¹⁷⁸ Fiat (1975): Proposal for Straight-Line and In-A-Turn Braking Test Procedures

¹⁷⁹ Otto (1987): Lastwechselreaktionen von PKW bei Kurvenfahrt, S. 43

¹⁸⁰ Rundkuist (1974): Steerability During Emergency Braking

¹⁸¹ Rompe et al. (1980): Erprobung eines Testverfahrens für das Bremsen in der Kurve

¹⁸² Witte (1995): Stabilisierung der Gierbewegung in kritischen Fahrzuständen

¹⁸³ Kudritzki (1989): Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens

¹⁸⁴ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 14

¹⁸⁵ Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

¹⁸⁶ von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 14

Eine Ursache für die deutlichen Abweichungen zwischen den genannten Akzeptanzgrenzen könnte in der Verwendung des Schwimmwinkels im Fahrzeugschwerpunkt als objektivem Bewegungskennwert begründet sein: Nach Kapitel 2.1.1 geht neben den Schräglaufwinkeln der jeweiligen Fahrzeugachsen anteilig auch der Lenkradwinkel in den Schwimmwinkel des Fahrzeugschwerpunkts mit ein. Somit besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt und dem Fahrzustand des Fahrzeugs.

Tabelle 2.4 Veröffentlichte Akzeptanzgrenzen der Giergeschwindigkeitsabweichung und des Schwimmwinkels im Fzg.-Schwerpunkt

Testverfahren	Kennwert	genannte Akzeptanzgrenze
Fiat, 1975 Bremsen in der Kurve		$\leq 0,5 \cdot \dot{\psi}_{ref}$
Otto 1987 Gaswegnahme in der Kurve		Gefährlichkeitsgrenze 57ss Gierbeschleunigung $\ddot{\psi}_{max}$ (keine Angabe zu Giergeschwindigkeitsabweichung)
Neukum/Krüger, Wallentowitz, 2006 Kreisfahrt - Vertikaldynamikstörungen		>67s häufig störend, >87s teilweise gefährlich
Neukum/Krüger - VDA AK 2007 Störung durch Überlagerungslenkung (AFS)	$\Delta \dot{\psi}_{max/1s}$	47s (50 km/h), 37s (100 km/h), 2,57s (150 km/h)
Neukum/Krüger - 2010 Störung durch Lenkmomentenaufschaltung (EPS)		Beurteilung analog AFS
Wesp 2011 Störung durch Hinterradlenkeingriffe (HSR)		127s (100 km/h), 7,87s (150 km/h)
Schwedischer Vorschlag 1974 Bremsen in der Kurve		Empfehlung <20°
Rompe/Grunow/Tupova 1980 Bremsen in der Kurve		Empfehlung <15°
Kudritzki 1989 allgemeine Angabe		bis 4° nicht wahrgenommen
Witte 1995 allgemeine Angabe	$\beta_{SP,max/1s}$	bis 20° nicht als kritisch beurteilt
Jürgensohn 1997 allgemeine Angabe		ab 4° als unangenehm eingestuft
Keinert, 2004 Stabilitätsbewertung Lenkimpuls		ab 5° für den Fahrer kritisch
von Glasner, 2009 allgemeine Angabe		5° unkritisch, ab 10° kritisches Fahrverhalten

Weitere Aussagen zu tolerierbaren Giergeschwindigkeitsabweichungen $\Delta \dot{\psi}_{max}$ wurden in den zusammengefassten Closed-Loop-Studien zur Störungsbeurteilung von Lenksystem- und Fahrwerkstörungen in Kapitel 2.2.1 abgeleitet. Die Ergebnisse erscheinen ebenfalls nicht einheitlich, wobei Gierstörungen infolge von Lenksystemstörungen^{187,188,189,190} (AFS, EPS) nach Tabelle 2.4 scheinbar deutlich kritischer beurteilt werden als Gierstörungen infolge von Vertikaldynamikstörungen¹⁹¹ oder durch Hinterrad-

¹⁸⁷ Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

¹⁸⁸ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures

¹⁸⁹ Neukum (2010): Controllability of erroneous steering torque interventions

¹⁹⁰ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

¹⁹¹ Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug- Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen

lenkeingriffe¹⁹². Dies lässt den Rückschluss zu, dass die Störungsursache einen maßgebenden Einfluss auf die erzielte subjektive Fahrsicherheit von Normalfahrern hat. Somit sind die genannten Akzeptanzgrenzen aus den Untersuchungen zu Lenksystemstörungen an der Vorderachse nicht direkt auf die Bewertung des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern übertragbar. Die genannten Akzeptanzgrenzen auf Basis einer Hinterradlenkung erscheinen hierzu vielversprechender, da durch eine Hinterradlenkung zwar Einfluss auf das Fahrverhalten genommen wird, jedoch keine unmittelbare Veränderung des Lenkradmoments infolge der Störaufschaltung resultiert.

2.3 Fahrsicherheit und Fahrzeugführung

Im Anschluss an die Zusammenfassung der bekannten Fahrmanöver und Beurteilungskriterien des Fahrverhaltens wird in diesem Abschnitt die Bedeutung des Begriffs „Fahrsicherheit“ als Bestandteil der „Aktiven Sicherheit“ diskutiert. Dabei wird auf die bestehenden Kenntnisse bezüglich des Zusammenwirkens von Fahrer und Fahrzeug bei der Bewältigung einer Fahraufgabe eingegangen und es werden mögliche Ansatzpunkte aus dem Bereich der regelungstechnischen Fahrermodelle zur Prüfung der Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch Normalfahrer erörtert.

2.3.1 Aktive Sicherheit

Unter dem Begriff „Aktive Sicherheit“ werden seit den 60er-Jahren

„...alle Maßnahmen und Einrichtungen am Fahrzeug zur Verhinderung von Unfällen in Folge von technischen Mängeln, dem Menschen nicht angepassten Fahreigenschaften oder Fahrfehlern...“

zusammengefasst.¹⁹³

Die Maßnahmen der Aktiven Sicherheit werden 1967 von Wilfert in die vier Teilbereiche

- Fahrsicherheit,
- Konditionssicherheit,
- Wahrnehmungssicherheit und
- Bediensicherheit

aufgeteilt, siehe Bild 2.10. Diese Aufteilung besteht bis heute, siehe Braess/Donges¹⁹⁴.

¹⁹² Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung

¹⁹³ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

¹⁹⁴ Braess, Donges (2006): Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen

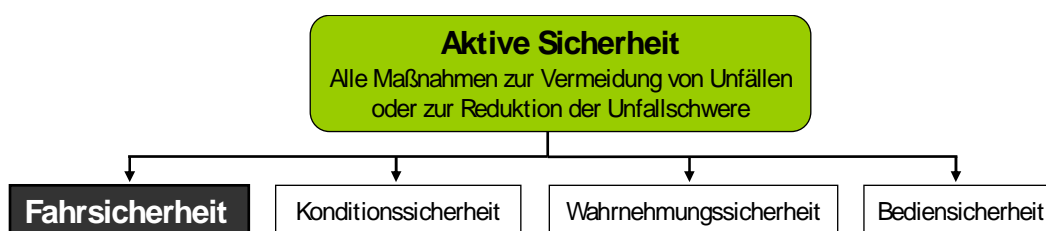


Bild 2.10 Einteilung der Aktiven Sicherheit in vier Kategorien nach Wilfert¹⁹⁵ (1967)

Als Bestandteil der Aktiven Sicherheit beinhaltet die Fahrsicherheit dementsprechend all jene Maßnahmen, die der optimalen Anpassung des Fahrverhaltens an den Fahrer dienen, mit dem Ziel, Unfälle bereits in ihrer potentiellen Entstehungsphase zu verhindern. Das Fahrverhalten wird durch die Fahrzeugreaktion auf alle Fahrerhandlungen und Störungen im geschlossenen Regelkreis aus Fahrer, Fahrzeug und Umwelt beschrieben.^{196,197} Dabei bestimmt nach Rompe/Heißing die „richtige Funktion“ des Systems aus Fahrer, Fahrzeug, Straße und Umwelt die Straßenverkehrssicherheit.¹⁹⁸ Zur Beschreibung dieser „richtigen Funktion“ existieren zahlreiche qualitative Beschreibungen einer geeigneten Anpassung des Fahrverhaltens an den Menschen. So muss das Fahrzeug diversen Autoren zufolge an die Fähigkeiten und Eigenschaften des Fahrers angepasst werden^{199,200,201,202,203}, vorhersehbar und erwartungsgemäß auf die Regeltätigkeiten des Menschen reagieren^{204,205,206,207} und möglichst unempfindlich gegenüber Störgrößen sein.²⁰⁸

Als wichtigste Aufgabe des Fahrers im Regelkreis aus Fahrer, Fahrzeug und Umwelt nach Bild 2.11 wird die Fahrzeugführung und die Stabilisierung des Fahrzeugs auf einem sicheren Sollkurs verstanden.^{209,210,211,212,213} Dabei ist nach Donges/Rompe (1982)

¹⁹⁵ Wilfert (1967): Sicherheitsprobleme bei der Entwicklung von Personenwagen, S. 48ff

¹⁹⁶ Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

¹⁹⁷ Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

¹⁹⁸ Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

¹⁹⁹ Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

²⁰⁰ Hoffmann (1975): Human Control of Road Vehicles, S. 105ff

²⁰¹ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage

²⁰² Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop

²⁰³ Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

²⁰⁴ Donges (1992): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium

²⁰⁵ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

²⁰⁶ Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

²⁰⁷ Schögl (2007): Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens

²⁰⁸ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

²⁰⁹ Bruder et al. (2009): Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens

²¹⁰ Bubb (2003): Fahrerassistenz primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit?, S. 257ff

²¹¹ Donges (1992): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium

²¹² Freitag et al. (2001): Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen

²¹³ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

die Wahl sicherer Führungsgrößen durch den Fahrer für einen sicheren Fahrtverlauf entscheidend und der zulässige Bewegungsbereich durch Fahrsituation, Fahrbahnmarkierung und Beschilderungen vorgegeben. Schafft es der Fahrer also, sein Fahrzeug auf einem sicheren Sollkurs zu stabilisieren, kann die Fahrt als objektiv sicher angesehen werden.

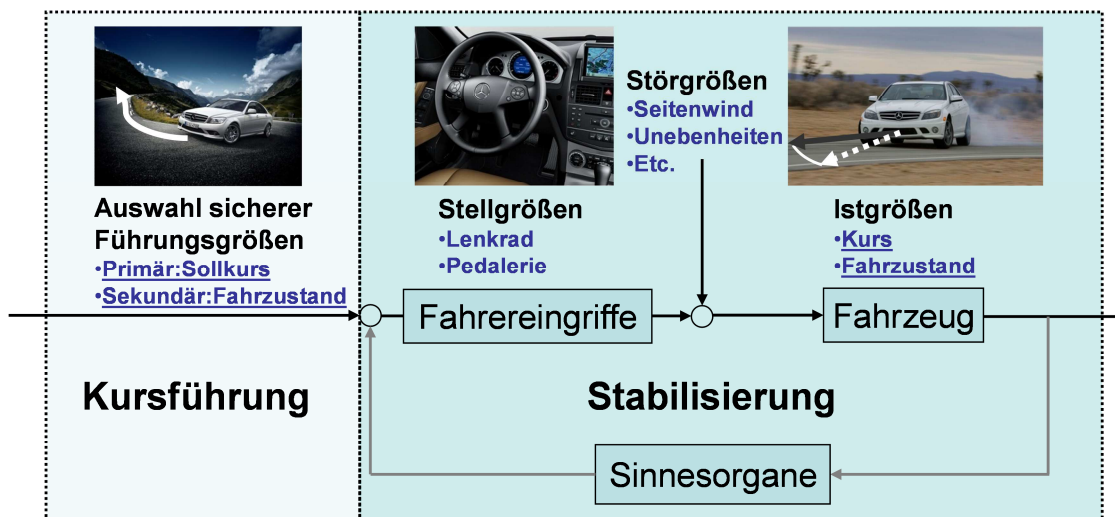


Bild 2.11 Regelkreis Fahrer – Fahrzeug – Umwelt, unterteilt in die beiden Hauptaufgaben des Fahrers basierend auf Donges/Rompe²¹⁴

Auf Basis der Theorie verschiedener Handlungsebenen der menschlichen Informationsverarbeitung nach Rasmussen²¹⁵ ordnet Donges²¹⁶ die Aufgabe der Kursführung aus Bild 2.11 einem bewussten, regelbasierten Entscheidungsprozess zu. Die anschließende Stabilisierung des Fahrzeugs auf diesem bewusst gewählten Sollkurs wird als weitestgehend unbewusste Handlung angesehen, die nach dem Muster zuvor erlernter Reiz-/Reaktionsschemata ablaufe. Der Übergang zwischen regelbasierter und reflektorischer Handlung wird von Donges allerdings als fließend beschrieben: Der Fahrer kann seine zunächst unbewussten Reaktionen im Anschluss an die erlebte Situation analysieren und sein Verhaltensmuster für zukünftige Situationen adaptieren. Daher ist der Fahrer speziell in nicht alltäglichen Situationen, z.B. einem benötigten Ausweichvorgang mit hoher Kraftschlussausnutzung oder der Bremsung auf glatter Fahrbahn, auf ein Fahrverhalten angewiesen, das zu seinen zuvor erlernten Handlungsmustern passt. Auf ein für ihn unerwartetes Fahrverhalten kann der Fahrer nicht angemessen reagieren, da seine Stabilisierungshandlungen nach Donges auf bisherigen Erfahrungen beruhen. Diese Erfahrungen sammelt der Fahrer nach McAdam im quasi-stationären Bereich des Fahrverhaltens,

²¹⁴ Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren, S. 6

²¹⁵ Rasmussen (1983): Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models, S. 139ff

²¹⁶ Donges (1992): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium

innerhalb dessen die Querkraft nahezu proportional zu den Lenkeingaben verläuft.²¹⁷ Die Güte des Fahrverhaltens im Sinne der Aktiven Sicherheit kann also daran gemessen werden, ob der Fahrer auch in ungewohnten Fahrsituationen, welche starke Bremsenriffe oder schnelle und heftige Lenkbewegungen zur Unfallvermeidung erfordern können, in der Lage ist, das Fahrzeug auf einem sicheren Kurs zu stabilisieren. Speziell in den 70er-Jahren herrscht die Überzeugung vor, eine wirksame Unfallvermeidung sei nur durch eine bessere Handhabung der Fahrzeuge zu erzielen²¹⁸ und ein optimal an den Menschen angepasstes Fahrverhalten müsse zur Minimierung des Unfallrisikos beitragen.^{219,220}

2.3.2 Unfallursachen

Durch die Analyse von Unfallursachen und der Unfallentstehung können Potentiale hinsichtlich einer möglichen Steigerung der Aktiven Sicherheit durch eine Unterstützung des Fahrers bei der Vermeidung von Unfällen identifiziert werden.²²¹ Die Forderung aus den 70er-Jahren, das Fahrzeugverhalten müsse für eine wirksame Unfallvermeidung besser an den Fahrer angepasst werden, kann zunächst allerdings in keinen direkten Bezug zu den aus der Unfalldatenerhebung bekannten Unfallursachen gesetzt werden: Pro Unfall können durch die Polizeibeamten in Deutschland beispielsweise maximal zwei der möglichen allgemeinen Unfallursachen (u.a. Straßenverhältnisse, Witterungseinflüsse oder Hindernisse) und jeweils maximal drei personenbezogene Falschverhalten bei Hauptverursacher und einer weiteren Person dokumentiert werden.²²² Diese Unfallursachen geben jedoch keine eindeutigen Hinweise auf einen möglichen Kontrollverlust durch ein übermäßig schwer zu beherrschendes Fahrverhalten. Wie von Gründl erörtert, werden vielmehr der Fahrer und sein Falschverhalten bereits Ende des 19. Jahrhunderts als die Hauptursache von Verkehrsunfällen angesehen.²²³ Diese Einschätzung bleibt auch im Verlauf des 20. Jahrhunderts bestehen.²²⁴ Nach der von Gründl angeführten GIDAS-Datenbank (German in Depth Accident Study) werden im Zeitraum von 1973 bis 2005 93,5 % aller Verkehrsunfälle auf menschliches Falschverhalten zurückgeführt. Im Berichtsjahr 2010 des statistischen Bundesamtes entfallen auf jeden Verkehrsunfall mit Personenschaden im Mittel sogar 1,2 menschliche Fehler.²²⁵ Bild 2.12 zeigt den Anteil des statistisch erfassten menschlichen Falschverhaltens in Verkehrsunfällen mit Ge-

²¹⁷ McAdam (1981): Optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, S. 393ff

²¹⁸ Rönitz (1978): Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW – eine Übersicht

²¹⁹ Hoffmann (1975): Human Control of Road Vehicles, S. 105ff

²²⁰ Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

²²¹ Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme

²²² Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle 2010, S. 10

²²³ Gründl (2005): Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen

²²⁴ Schurmann (1994): On the use of discrete proprioceptive-tactilewarning systems during manual control

²²⁵ Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle 2010, S. 41

töteten im Jahr 2010 in Deutschland. Mit ca. 40 % ist der Anteil einer nicht an die Umgebungsbedingungen oder Beschilderungen angepassten Fahrgeschwindigkeit am größten, gefolgt von einer falschen Straßenbenutzung und einer eingeschränkter Verkehrstüchtigkeit. Allgemeine Ursachen wie Straßenglätte, Regen, Schnee oder Sichtbehinderungen sind bei 17 % aller Unfälle mit Personenschaden mitauslösend, während technische Defekte nur bei 0,7 % aller beteiligten Fahrzeuge festgestellt werden.

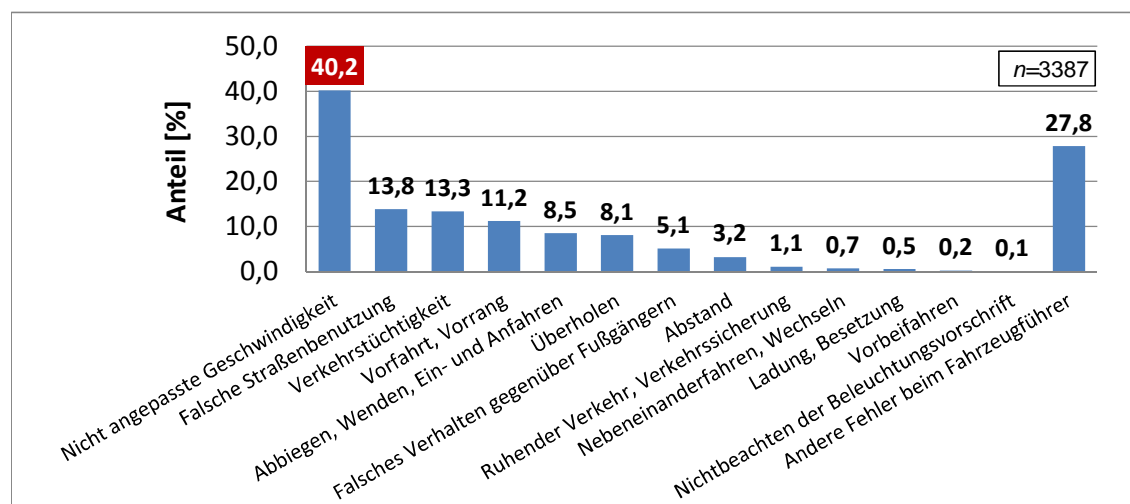


Bild 2.12 Anteil des menschlichen Falschverhaltens in Verkehrsunfällen mit Getöteten in Deutschland (2010), nach den Daten des Statistischen Bundesamtes

Daher darf zu Recht, wie z.B. von Jürgensohn, infrage gestellt werden, ob aus der Betrachtung von Unfallursachen überhaupt Rückschlüsse auf ein unzureichend an den Fahrer angepasstes Fahrverhalten getroffen werden können.²²⁶ Nach Zomotor et al. bedeutet Fahrsicherheit im Sinne der Aktiven Sicherheit insbesondere aber auch die Ausprägung einer größtmöglichen Fehlertoleranz gegenüber möglichen Fehlhandlungen des Fahrers.²²⁷ Die Hauptursache „menschliches Falschverhalten“ in Verkehrsunfällen steht also in keinem direkten Widerspruch zu dem vorhandenen Entwicklungsziel, das Fahrverhalten „optimal“, sprich im Sinne einer größtmöglichen Fehlertoleranz, an den Fahrer anzupassen.

Nach Braun/Ihme und Bild 2.13 entstehen Unfälle in Gefahrensituationen dann, wenn der Fahrer den zur Stabilisierung des Fahrzeugs verfügbaren Spielraum durch fehlerhafte oder ganz ausbleibende Reaktion so lange nicht nutzt, bis der Unfall letztlich eintritt. Dabei wird nach Bild 2.13 von einer externen Störung als Unfallinitial ausgegangen, die den Stabilisierungsspielraum verringert und zusätzlich eine zielgerichtete Handlung des Fahrers zur Stabilisierung notwendig macht.

²²⁶ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 24ff

²²⁷ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

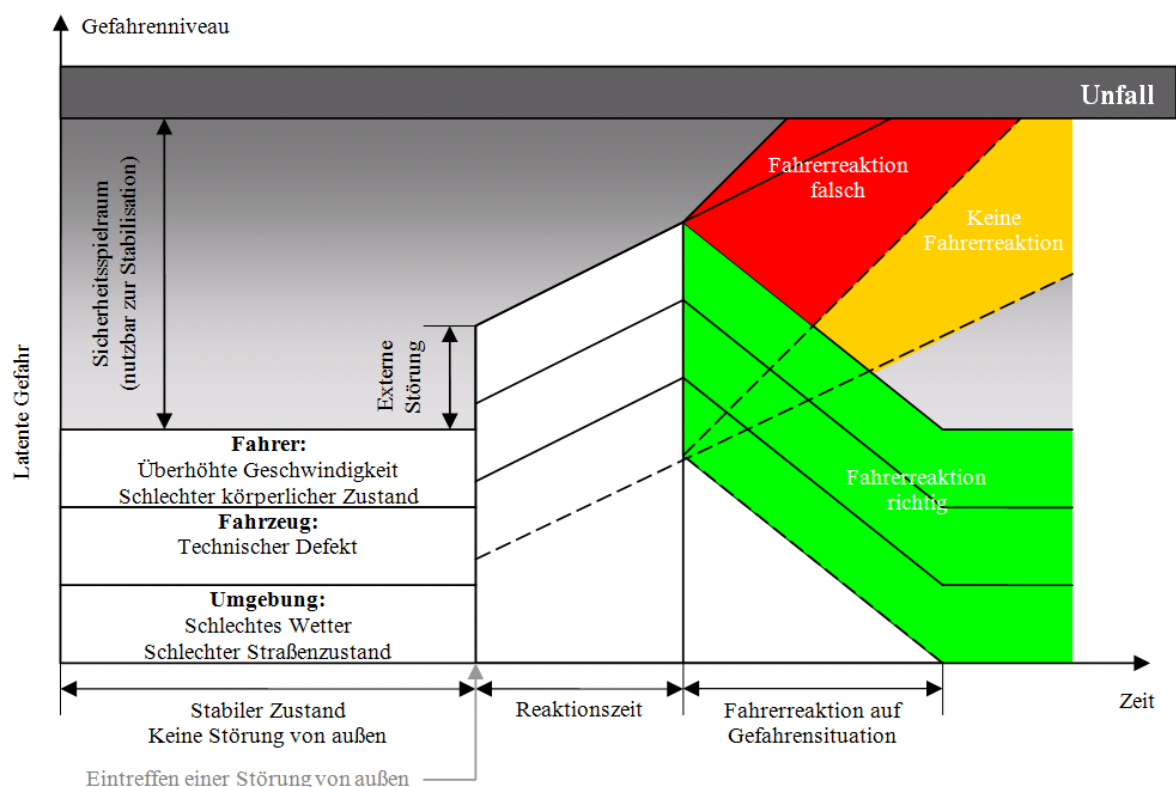


Bild 2.13 Sicherheitspielraum in der Stabilisierungsphase nach Braun/Ihme²²⁸

Diese Darstellung kann auch auf das Fahrverhalten in kritischen Fahrsituationen übertragen werden: Nach Braun/Ihme besteht demnach bereits in ungestörter Fahrt eine „latente Gefahr“, die durch ungünstige Umgebungsbedingungen (z.B. Straßenglätte), das Fahrzeug selbst (technische Defekte) und den Menschen (z.B. erhöhte Fahrgeschwindigkeit oder eingeschränkte Fahrtüchtigkeit) beeinflusst wird. Hierin finden sich die wesentlichen aus der Unfallstatistik bekannten Unfallursachen aus Bild 2.12 wieder. Des Weiteren kann eine auf das Fahrverhalten bezogene „Störung“ in dieser Modellbetrachtung z.B. durch das Auftreten eines Hindernisses oder das Ausbrechen des Fahrzeugs auf glatter Fahrbahn gegeben sein. In beiden Fällen ist eine zielgerichtete Fahrerhandlung zur Stabilisierung des Fahrzeugs auf einem sicheren Sollkurs notwendig.

In der Darstellung nach Bild 2.13 würde nun neben technischen Defekten auch ein nicht an die Fähigkeiten des Fahrers angepasstes Fahrverhalten das Verunfallungsrisiko erhöhen, indem eine „richtige Reaktion“ des untrainierten Normalfahrers zur Stabilisierung des Fahrzeugverhaltens unwahrscheinlich ist. Das menschliche Falschverhalten tritt in dieser Überlegung erst durch ein offensichtlich unzureichend sicheres Fahrergebnis (Unfall) zu Tage und steht somit in einem direkten Zusammenhang mit dem Fahrverhalten des Fahrzeugs. Da nach bisherigen Erkenntnissen angenommen werden kann, dass

²²⁸ Braun/Ihme (1983): Definition kritischer Situationen im Kraftfahrzeugverkehr – Eine Pilotstudie

die Reaktionen des Fahrers während der Stabilisierung des Fahrzeugs weitestgehend unbewusst ablaufen²²⁹ und hierbei auf vorherige Erfahrungen im quasi-stationären Bereich zurückgegriffen wird²³⁰, ist das Falschverhalten des Fahrers bei der Stabilisierung des Fahrzeugs folgerichtig nur durch eine geeignete Anpassung des Fahrverhaltens an den Menschen vermeidbar.²³¹ Einschränkung ist jedoch zuzusagen, dass dies nur für zielgerichtete Handlungen des Fahrers gelten kann, die zur Einhaltung sicherer Führungsgrößen des Fahrzeugs aufgewandt werden. Ab einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit kann das Fahrzeug infolge physikalischer Grenzen nicht mehr auf einem sicheren Kurvenradius gehalten werden. Ebenso können Fehleinschätzungen des Straßenverlaufs, Unaufmerksamkeit und Passivität durch eingeschränkte Fahrtüchtigkeit unabhängig von einem unzureichend an den Fahrer angepassten Fahrverhalten zu einem Verlust der Fahrzeugkontrolle führen. Einen Ausgleich dieser Defizite streben wiederum die bereits vorhandenen oder zukünftig entwickelten Systeme der Fahrerassistenz an.

Die Unfalldisposition in Abhängigkeit der Fahrweise und der Fahrerfahrung wird von Braess/Donges nach Bild 2.14 diskutiert:

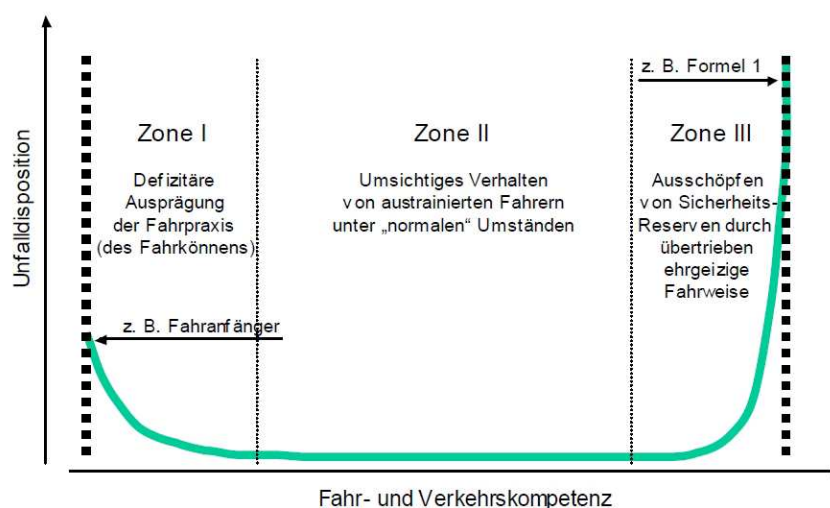


Bild 2.14 Unfalldisposition in Abhängigkeit der Fahrpraxis und der Fahrweise nach Braess/Donges²³²

Demnach sind Fahrer mit defizitärer Ausprägung des Fahrkönnens in *Zone I* einem erhöhten Verunfallungsrisiko ausgesetzt. Gleiches gilt für Fahrer mit hoher Fahrkompetenz in *Zone 3*, die durch „ehrgeizige Fahrweise“ den physikalischen Grenzbereich ausloten. Fahrern mit austrainiertem Fahrkönnen und „umsichtiger“ Fahrweise in *Zone 2* wird dementsprechend ein niedrigeres Verunfallungsrisiko zugeschrieben. Der Einfluss

²²⁹ Donges (1992): Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium

²³⁰ McAdam (1981): Optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, S. 393ff

²³¹ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage

²³² Braess, Donges (2006): Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen, S. 3

der Fahrerfahrung auf die Häufigkeit des menschlichen Falschverhaltens im Straßenverkehr wird durch zwei von Braess/Donges zitierte Studien belegt: Mit steigender Fahrpraxis wird ein durchschnittliches Niveau der Häufigkeit menschlichen Falschverhaltens erreicht und die Unfallhäufigkeit nähert sich asymptotisch durchschnittlichen Werten an.²³³

Eine Begründung suchen Braess et al. im Lernprozess des Fahrzeugführers: Mit steigender Fahrerfahrung sinkt nach Donges der Anteil an bewusstem, regelbasiertem Handeln des Fahrers und das erlernte situationsabhängige Handeln geht in unbewusste Handlungsmuster über.²³⁴ Der Abruf dieser geeigneten Handlungsmuster zur Situationsbewältigung beansprucht in der Theorie der menschlichen Informationsverarbeitung nach Rasmussen deutlich weniger Zeit als die bewusste Auswahl von geeigneten Lösungsstrategien unter einer Vielzahl von Handlungsalternativen.²³⁵ Somit reagiert der Fahrer in bereits bekannten Fahrsituationen nicht nur richtig, sondern auch schneller. In unfallrelevanten Situationen kann dieser Gewinn an Zeit nach Donges ausschlaggebend sein.²³⁶ Unabhängig von der individuellen Fahrerfahrung wird daher gefordert, den Bedarf an bewussten Handlungen zur Fahrzeugführung zu minimieren.²³⁷ Ein Vergleich der 2010 in Deutschland dokumentierten Unfallursachen zeigt, dass jungen Fahrern in Unfallsituationen häufiger überhöhte Geschwindigkeit und Abstandsfehler vorgeworfen werden, während ältere Fahrer hingegen häufiger die Vorfahrt missachten.²³⁸ Zu dem von Braess/Donges nach Bild 2.14 angeführten defizitären Fahrkönnen von Fahranfängern kann analog zu *Zone 3* also auch eine ehrgeizigere Fahrweise als Erklärung für signifikant erhöhte Unfallzahlen von Fahranfängern herangezogen werden.

Die Schwierigkeit bei der Interpretation von Unfallstatistiken besteht in der Identifikation von Unfällen, die durch ein besser an den Fahrer angepasstes Fahrverhalten tatsächlich vermeidbar gewesen wären. Dieser Anteil kann aus der Unfallstatistik aufgrund der fehlenden Informationen zum tatsächlichen Unfallhergang in der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug zunächst nicht entnommen werden.

Dennoch verbleibt eine Möglichkeit zur Analyse der Wirkpotentiale für die Optimierung des Fahrverhaltens auf Basis von Unfallzahlen:

- 1. Identifizierung der Unfalltypen mit vermutetem Bezug zum Fahrverhalten

²³³ Willmes-Lenz (2003): Internationale Erfahrung mit neuen Ansätzen zur Absenkung des Unfallrisikos junger Fahrer und Fahranfänger

²³⁴ Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

²³⁵ Rasmussen (1983): Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models, S. 139ff

²³⁶ Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

²³⁷ Förster (1987): Menschliches Verhalten, eine vergessene Ingenieur-Wissenschaft?

²³⁸ Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle 2010

- 2. Betrachtung der Entwicklung von Unfallzahlen infolge bereits bekannter Weiterentwicklungen des Fahrverhaltens (z.B. durch ABS oder ESP)
- 3. Rückschluss auf aktuelle Entwicklungspotentiale

1. Relevante Unfalltypen:

Die Unfallstatistik in Deutschland unterscheidet sieben verschiedene Unfalltypen, siehe Bild 2.11. Hiervon kann insbesondere der „Fahrerunfall“ in einen direkten Bezug zum Fahrverhalten gesetzt werden. Ein Fahrerunfall liegt nach dem Statistischen Bundesamt vor, wenn der Fahrer ohne Fremdeinwirkung die Kontrolle über sein Fahrzeug verliert. Ein Fahrerunfall ist somit immer das Resultat eines fehlerhaften Zusammenwirkens von Fahrer und Fahrzeug auf der Kursführungs- und Stabilisierungsebene nach Bild 2.11. Dies kann jedoch auch durch Müdigkeit oder Ablenkung geschehen.

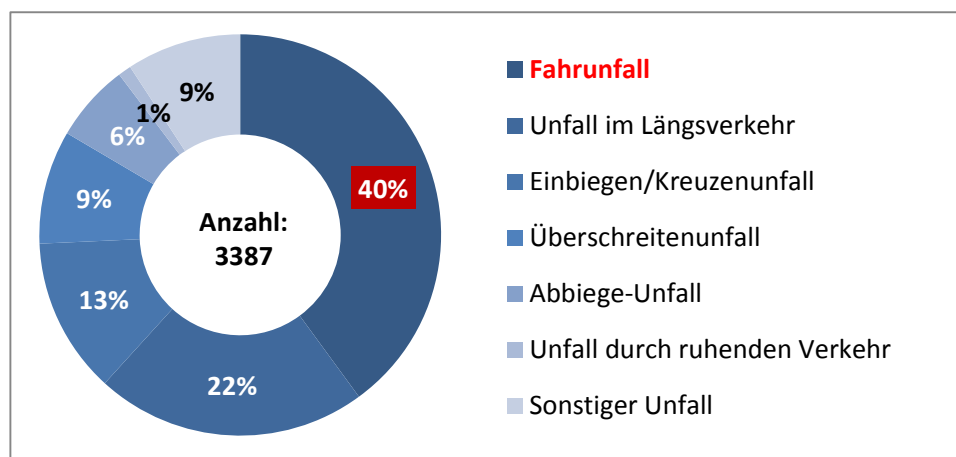


Bild 2.15 Anteil der statistisch erfassten Unfalltypen an der gesamten Anzahl von Verkehrsunfällen mit Getöteten in Deutschland (2010), nach Daten des Statistischen Bundesamtes

Bei Fahrerunfällen kann, wie oben diskutiert, allerdings nicht belegt werden, ob der Unfall durch menschliches Falschverhalten unvermeidbar war (z.B. durch stark überhöhte Geschwindigkeit, falsche Einschätzung des Straßenverlaufs und Bewusstlosigkeit), oder der Fahrer durch ein unzureichend an die Fahrfertigkeiten von Normalfahrern angepasstes Fahrverhalten des Fahrzeugs überrascht und überfordert wurde. Fahrerunfälle hatten 2010 in Deutschland nach Bild 2.15 mit ca. 40 % den höchsten Anteil aller Unfalltypen an Verkehrsunfällen mit Getöteten. Dieser Anteil wird im internationalen Vergleich bestätigt: Nach mehreren 2006 von Knoll zusammengetragenen Studien geht tödlichen Unfällen in 40 % aller Fälle ein Schleudern des Fahrzeugs (Kontrollverlust) voraus.²³⁹

²³⁹ Knoll (2006): Der Sicherheitsaspekt von ESP in Realunfällen

Seit 2006 ist der Anteil von Fahrurfällen an tödlichen Unfällen in Deutschland wiederum nahezu unverändert geblieben (2006: 42 %).²⁴⁰

2. Retrospektive Betrachtung von Unfallzahlen:

Das Potential zur Vermeidung von Fahrurfällen durch ein besser an den Fahrer angepasstes Fahrverhalten konnte vor wenigen Jahren durch die Einführung des elektronischen Stabilitätsprogramms ESP nachgewiesen werden. ESP unterstützt den Fahrer in kritischen Situationen, indem es die Schleudergefahr in Kurvenfahrt, während Ausweichsituationen oder in Bremsmanövern durch gezielte Einzelradbremsung verringert.²⁴¹ Radselektive Einzelradbremsen nehmen also Einfluss auf das Fahrverhalten, indem die Fahrzeugreaktion auf Fahrereingaben in Richtung eines stabileren Fahrzustandes verändert wird. Die nachträgliche Betrachtung der Unfallstatistik von Fahrzeugen, die mit ESP ausgestattet sind, ergibt nach den von Fach et al. in Bild 2.16 zusammengefassten Studien mehrerer Fahrzeughersteller (DaimlerChrysler, Toyota, VW, Renault/Peugeot, Ford) und von Behörden (NHTSA, IHS, SRA Schweden) eine signifikante Verringerung von Fahrurfällen bzw. ESP-sensitiven Unfällen im Vergleich zu Fahrzeugen ohne ESP.

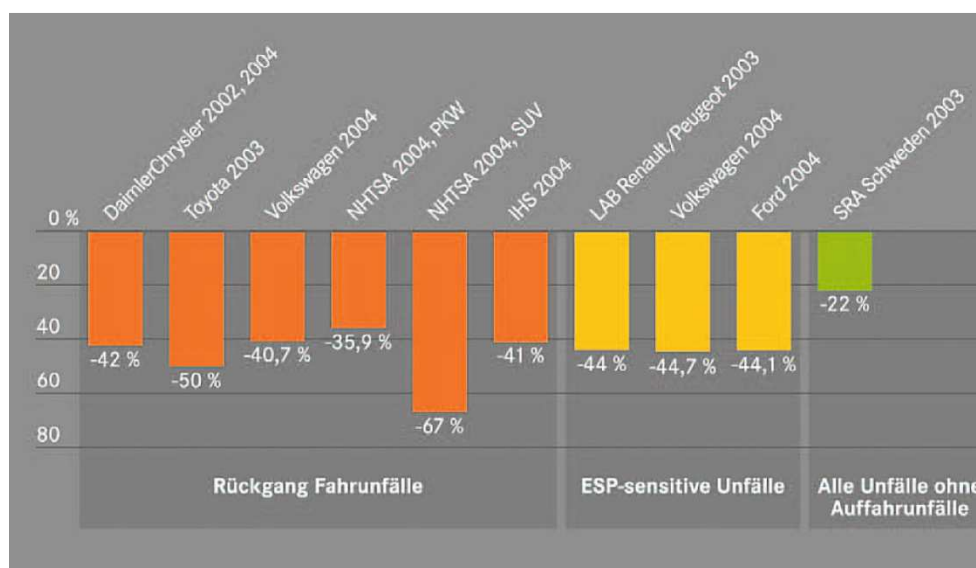


Bild 2.16 Statistisch nachgewiesene Wirksamkeit von ESP bei der Vermeidung von Unfällen, zusammengestellt von Fach et al.²⁴²

Die Ergebnisse der Studien ohne Unterscheidung der jeweiligen Fahrzeugklasse liefern vergleichbare Ergebnisse des Rückgangs an Fahrurfällen bzw. ESP-sensitiven Unfällen im Bereich zwischen 40-50 %. Eine Ausnahme stellt die in Bild 2.16 angeführte schwe-

²⁴⁰ Vorndran (2007): Unfallgeschehen im Straßenverkehr

²⁴¹ Mücke, Breuer (2007): Bewertung von Sicherheitssystemen im Fahrversuch

²⁴² Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme, S. 70

dische Studie dar (Bild 2.16, rechts, -22 %), in der alle Verkehrsunfälle bis auf Auffahrunfälle gemeinsam betrachtet werden. Die Verkehrssicherheitsbehörde der USA (NHTSA) weist zusätzlich auf einen im Vergleich zu PKW deutlicheren Rückgang von Fahrunfällen bei SUVs hin (67 % zu 36 %).²⁴³ Neben der nachträglichen Analyse von Unfallzahlen existieren zusätzlich Probandenstudien in Realfahrten und an Fahrsimulatoren, die eine Wirksamkeit des ESP zur nahezu vollständigen Vermeidung von Schleuderunfällen belegen.^{244,245,246}

3. Rückschluss auf verbleibende Optimierungspotentiale:

Mit Einführung des ESP werden rückblickend zuvor ungenutzte Potentiale zur Verbesserung des Fahrverhaltens aufgezeigt und genutzt. Der Rückgang von Fahrunfällen um ca. 40-50 % bestätigt die Annahme, dass menschliches Falschverhalten zwar stets als die Hauptursache von Verkehrsunfällen genannt wird, zahlreiche Fahrunfälle aber dennoch durch ein optimal an den Fahrer angepasstes Fahrverhalten vermeidbar sind. In den letzten Jahren stagniert der Anteil von Fahrunfällen am gesamten Unfallgeschehen.^{247,248} Dieser Umstand könnte darin begründet liegen, dass keine weitere Verbesserung des Fahrverhaltens der am Straßenverkehr teilnehmenden Fahrzeuge im Hinblick auf die Fahrsicherheit erzielt wurde, aber auch auf ein fehlendes weiteres Optimierungspotential des Fahrverhaltens hinweisen.

Die Gegenüberstellung der objektiven Bewegungskennwerte eines Fahrzeugs aus Kapitel 2.2.2 mit dessen tatsächlicher Unfalldisposition im realen Straßenverkehr könnte dieser Fragestellung nachgehen und Hinweise auf konkrete Verbesserungspotentiale des Fahrverhaltens von einzelnen im Markt befindlichen Fahrzeugen liefern. Hierzu fehlen jedoch fahrzeugindividuelle Statistiken und zudem könnte das Ergebnis durch den jeweiligen Fahrerkreis eines Fahrzeugs (vgl. Sportwagen und Limousine) mit abweichender mittlerer Ausprägung von Fahrfertigkeit und Fahrstil²⁴⁹ nicht eindeutig einem Einfluss des Fahrverhaltens zugeordnet werden. Ob eine weitere Reduzierung von Fahrunfällen durch die Verbesserung des Fahrverhaltens möglich ist, kann also aus den aktuellen Unfallzahlen nicht abgeleitet werden. Der nach wie vor hohe Anteil von Fahrunfällen an der gesamten Anzahl tödlicher Unfälle (ca. 40 %) schließt ein weiteres Verbesserungspotential des Fahrverhaltens hinsichtlich eines verbesserten Kurshaltevermögens durch Normalfahrer zumindest nicht aus.

²⁴³ NHTSA (2004): Preliminary Results Analysing the Effectiveness of ESC, Evaluation Note

²⁴⁴ Faulhaber (2003): Wirksamkeit und Akzeptanz des ESP durch Normalfahrer

²⁴⁵ Papelis et al. (2004): Study of ESC Assisted Driver Performance Using a Driving Simulator

²⁴⁶ Yamamoto, Kimura (1996): Influence of ABS on Rollover Accidents

²⁴⁷ Statistisches Bundesamt (2011): Verkehrsunfälle 2010

²⁴⁸ Vorndran (2007): Unfallgeschehen im Straßenverkehr

²⁴⁹ Braess, Donges (2006): Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen

2.3.3 Regelkreis Mensch-Fahrzeug

Einen weiteren Ansatz zur Analyse möglicher Optimierungspotenziale des Fahrverhaltens hinsichtlich einer verbesserten Stabilisierbarkeit durch Normalfahrer stellt die Betrachtung des Zusammenwirkens von Fahrer und Fahrzeug während der Kursführungsaufgabe dar. Seit den 50er- und 60er-Jahren wird neben dem Versuch der Objektivierung von Subjektivurteilen in standardisierten Testverfahren daher auch daran geforscht, das Zusammenwirken zwischen Fahrer und Fahrzeug besser zu verstehen und in Form von sogenannten *Fahrermodellen* beschreiben zu können, siehe z.B. Enke²⁵⁰, Fiala²⁵¹ und Kondo²⁵². Diese Fahrermodelle beschreiben den geschlossenen Regelkreis und reichen von der abstrakten Veranschaulichung der Kursführungsaufgabe bis hin zu konkreten regelungstechnischen Anwendungen. Nach Zomotor ist ein Unfall hierbei immer das Resultat des Versagens einer oder mehrerer Komponenten des Regelkreises.²⁵³

Ein bekanntes Modell zur Veranschaulichung der Fahrzeugführung ist das 1982 von Donges²⁵⁴ vorgestellte „3-Ebenen“ Modell, welches auf der Theorie zielgerichteter menschlicher Tätigkeiten von Rasmussen²⁵⁵ beruht. Nach Rasmussen wird zwischen *wissensbasiertem*, *regelbasiertem* und *fertigkeitsbasiertem* Verhalten unterschieden, siehe Bild 2.17 (links). Die sensorischen Informationen stoßen demnach entweder einen Entscheidungsprozess an (wissensbasiertes Verhalten), erlauben eine bewusste assoziative Zuordnung zu einer zielführenden Handlung (regelbasiertes Verhalten) oder führen zu einer direkten und unbewussten sensumotorischen Reaktion. Nach Donges können die Aufgaben des Fahrers nach folgender Entsprechung in die Verhaltenskategorien von Rasmussen eingeteilt werden:

- Wissensbasiertes Verhalten: Navigation und Routenplanung auf Basis von Informationen zum Straßennetz
- Regelbasiertes Verhalten: Bewusste Auswahl von Führungsgrößen (Sollkursverlauf und Sollgeschwindigkeit)
- Fertigkeitsbasiertes Verhalten: Weitestgehend unbewusste Stabilisierung der Istgrößen des Fahrzeugs auf den gewählten Führungsgrößen unter Einflussnahme auf die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs.

²⁵⁰ Enke (1966): Zusammenwirken von Fahrzeuglenker und Automobil, S.37ff

²⁵¹ Fiala, Wallner (1968): Untersuchung des Systems Fahrzeug-Fahrer bei einer Lenkung mit Zeitvorhalt

²⁵² Kondo (1953): Directional stability (when steering is added)

²⁵³ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 330

²⁵⁴ Donges (1982): Aspekte der Aktiven Sicherheit, S. 183ff

²⁵⁵ Rasmussen (1983): Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models, S. 139ff

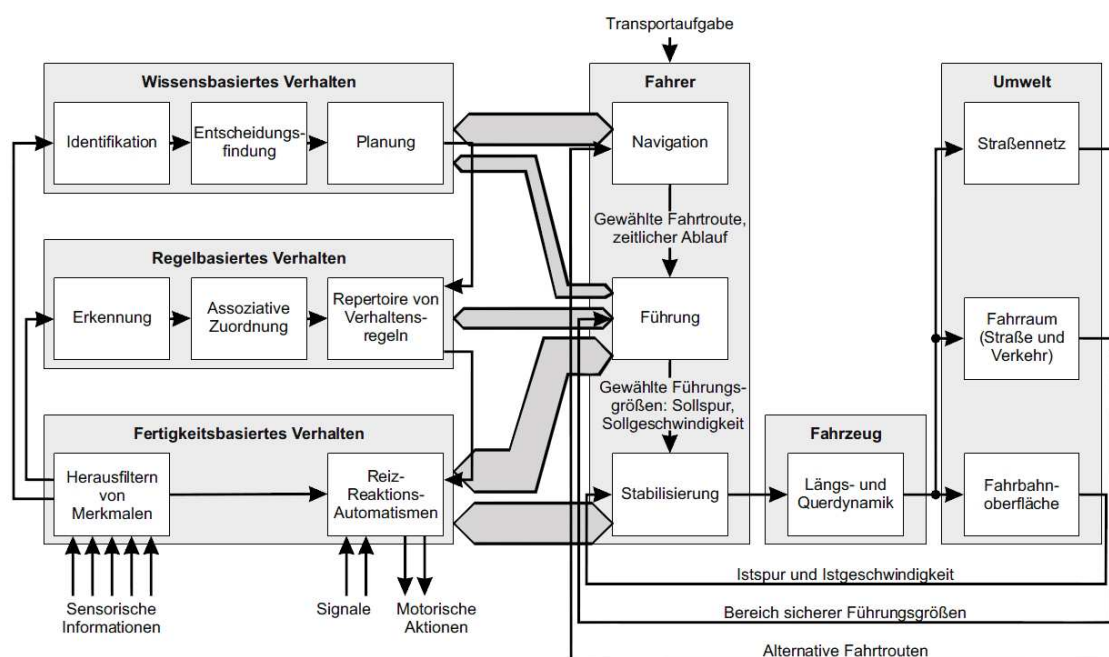


Bild 2.17 Kombination des 3-Ebenen Modells für zielgerichtete menschliche Tätigkeiten von Rasmussen²⁵⁶ mit dem hierarchischen 3-Ebenen Modell der Fahrzeugführung nach Donges²⁵⁷, dargestellt von Donges²⁵⁸

Der „dynamische Prozess“ des Fahrens findet nach Donges hierbei auf der bereits diskutierten Führungs- und Stabilisierungsebene statt.²⁵⁹ Demnach ist die bewusste antizipatorische Regelung auf der Führungsebene als eine Art Vorsteuerung (Open-Loop) zu sehen, während die unbewusste Nachregelung auf der Stabilisierungsebene die Regelabweichungen zwischen Soll- und Istgrößen reduzieren soll (Closed-Loop). Donges räumt, wie bereits erwähnt wurde, aber auch ein, dass der Übergang zwischen regelbasiertem Verhalten und reflektorischer Handlung fließend sei. Der Anteil der bewussten Handlungen zur Stabilisierung des Fahrzeugs nimmt nach Donges mit steigender Fahrerfahrung ab, weshalb sich der auftretende Zeitverzug einer Reaktion des Fahrers zur Stabilisierung des Fahrzeugs reduziert. Dieser Umstand ist für die Bewältigung einer kritischen Fahrsituation von Bedeutung, da in Abhängigkeit der Handlungsebene nach Donges und Bild 2.18 unterschiedliche Zeithorizonte einer notwendigen Fahrerhandlung auf ein potentiell kritisches Ereignis resultieren: Ist eine bewusste Entscheidung auf der Führungsebene erforderlich, können mehrere Sekunden oder sogar Minuten bis zur Handlungsauslösung notwendig sein, während auf der Stabilisierungsebene eine direkte Reaktion im niedrigen Sekundenbereich möglich ist.

²⁵⁶ Rasmussen (1983): Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models, S. 139ff

²⁵⁷ Donges (1982): Aspekte der Aktiven Sicherheit, S. 183ff

²⁵⁸ Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle, S. 15

²⁵⁹ Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle, S. 16f

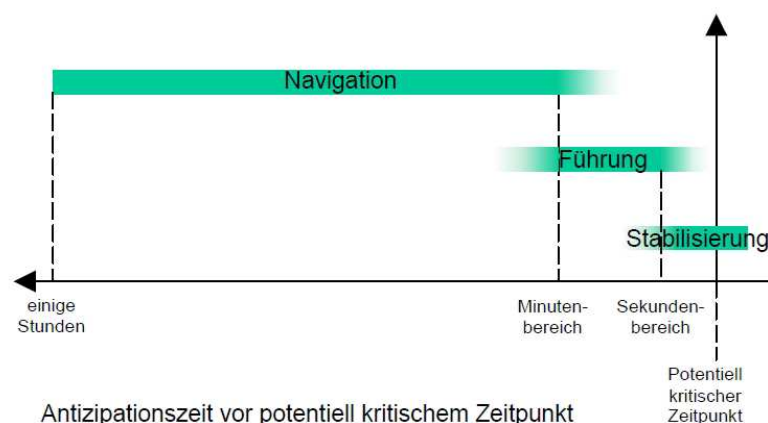


Bild 2.18 Typische Zeithorizonte der Fahrerhandlungen auf Navigations-, Bahnführungs-, und Stabilisierungsebene nach Donges²⁶⁰, zusammengefasst von Braess/Donges²⁶¹

Nach Braess/Donges ist die Reaktionszeit auch von der Komplexität der zu verarbeitenden Gefahrensituation abhängig, sprich davon, ob bewusste Handlungsschritte notwendig werden. Dahingegen scheint ein hoher Aufforderungsgrad die Reaktionszeit signifikant zu verringern, siehe Untersuchungsergebnisse von Zomotor²⁶² und Stanczyk²⁶³. Tabelle 2.5 zeigt eine Übersicht der bekannten Aussagen zu ermittelten oder angenommenen Reaktionszeiten in Abhängigkeit der auftretenden Situation. Als allgemeine Reaktionszeit ohne konkreten Bezug zur Situation nimmt das Oberlandesgericht Hamburg 1979 nach Krochmann²⁶⁴ eine Reaktionszeit von maximal 0,8 s bzw. 0,3 s bei „guten Fahrern“ an. Die minimale Reaktionszeit aus physiologischer Sicht liegt nach Krochmann bei 0,16 s. Bosch²⁶⁵ nennt Reaktionszeiten größer als 0,3 s, verweist aber auf die starke Abhängigkeit von persönlichen und äußeren Faktoren: Eingübte Reflexhandlungen führen demnach neben einer guten körperlichen Verfassung und einer gut zu überblickenden, auffälligen Situation zu einer kleineren Reaktionszeit. Notwendige „Wahlhandlungen“, komplizierte und schwer erkennbare Situationen verzögern nach Bosch hingegen analog zur Aussage von Braess/Donges²⁶⁶ die notwendige Reaktion.

²⁶⁰ Donges (1977): Untersuchung und Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern

²⁶¹ Braess, Donges (2006): Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen, S. 9

²⁶² Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

²⁶³ Stanczyk, Jurecki (2008): Fahrerreaktionszeiten in Unfallrisikosituationen

²⁶⁴ Krochmann (1979): Reaktionszeit von Kraftfahrern

²⁶⁵ Robert Bosch GmbH (2004): Fahrstabilisierungssysteme, S. 12f

²⁶⁶ Braess, Donges (2006): Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen, S. 9

Tabelle 2.5 Übersicht der in bekannten Studien ermittelten und veröffentlichten Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Situation bzw. des Reizes, teilweise enthalten bei Dietrich²⁶⁷

Situation/Reiz	Quelle	Jahr	genannte Reaktionszeiten
Allgemeine Reaktionszeit von Fahrern	Krochmann	1979	Oberlandesgericht Hamburg: maximal 0,8 s , bei guten Fahrern 0,3 s
	Bosch GmbH	2004	minimal mögliche physiologische Reaktionszeit: 0,16 s > 0,3 s , starke Abhängigkeit von inneren und äußeren Faktoren
Bremung auf Fußgänger	Zomotor	1991	abhängig vom Aufforderungsgrad (jeweils 5%-95%) niedrig: ca. 0,85-1,6 s , hoch: ca. 0,3-1,17 s
Bremung auf ein Hindernis	Stanczyk et al.	2008	abhängig vom Abstand zum Hindernis (jeweils 5%-95%) großer Abst.: ca. 0,25-0,8 s , geringer Abst.: ca. 0,15-0,6 s
Bremung auf Vorderfahrzeug	Mücke/Breuer	2007	0,4-0,6 s
	Krochmann	1979	bei Tag: 0,57-0,9 s (5 %, 99 %) bei Nacht: 0,69-1,15 s (5 %, 99 %)
Lenkmomentenstörung (Impuls)	Krüger	2000	0,07 s aus Eigenreflex der Haltemuskulatur,
Lenkmomentenstörung (Rechteckfunktion)	Neukum et al.	2009	Erhöhung der Greifkräfte zwischen 0,08-0,12 s kompensatorische Lenkeingabe ab ca. 0,18-0,22 s
Lenkmomentenstörung (Rampe)			ca. 0,7 s
Lenkmomentenänderung			0,15 s (Mittelwert)
Querschleunigungsänderung	Mitschke et al.	1974	0,2 s (Mittelwert)
Gierwinkeländerung			0,3 s (Mittelwert)
Stabilisierung (Fahrermodell)	Donges	2009	Totzeit ca. 0,5 s
Störung der Kurshaltung	Wallentowitz et al.	2002	ca. 0,8-1,0 s

In vier der bekannten Studien aus Tabelle 2.5 wird die Reaktionszeit von Fahrern in Bremssituationen untersucht: Zomotor ermittelt bei Bremsung auf unterschiedlich auffällige Fußgänger-Attrappen bei hohem Aufforderungsgrad (gute Sichtbarkeit, plötzliches Auftreten) eine signifikant niedrigere Reaktionszeit (ca. 0,3-1,17 s) als bei Bremsung auf schlecht sichtbare Fußgänger (ca. 0,85-1,6 s).²⁶⁸ Auch Stanczyk et al. ermitteln eine deutliche Abhängigkeit der Bremsreaktionszeit in Abhängigkeit des Aufforderungsgrades. Bremsungen auf Hindernisse in Nahdistanz erfolgen demnach signifikant schneller (0,15-0,6 s) als Bremsungen auf weiter entfernte Hindernisse (0,25-0,8 s).²⁶⁹ Mücke/Breuer ermitteln 2007 eine Reaktionsspanne von 0,4-0,6 s bei Bremsung auf ein Vorderfahrzeug.²⁷⁰ Die von Krochmann 1979 angegebenen Reaktionszeiten liegen mit 0,57-0,9 s bei ungestörten Sichtbedingungen und 0,69-1,15 s bei Nacht deutlich über dieser Angabe aus.²⁷¹ Die unterschiedlichen Ergebnisse bestätigen die Vermutung einer Abhängigkeit der Reaktionszeiten von äußeren Einflussfaktoren und insbesondere dem Aufforderungsgrad einer Situation. Gut sichtbare und plötzlich im Nahbereich vor dem Fahrzeug auftretende Bremsziele führen nach den zitierten Studien zusammenfassend zu einer Minimierung der Reaktionszeit.

²⁶⁷ Dietrich (2009): Entwicklung eines Versuchskonzepts zur Bewertung von Stabilisierungsfähigkeiten, S. 53ff

²⁶⁸ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 335ff

²⁶⁹ Stanczyk, Jurecki (2008): Fahrerreaktionszeiten in Unfallrisikosituationen

²⁷⁰ Mücke, Breuer (2007): Bewertung von Sicherheitssystemen im Fahrversuch

²⁷¹ Krochmann (1979): Reaktionszeit von Kraftfahrern

Weitere auf die querdynamische Kursführung bezogene Reaktionszeiten werden in Untersuchungen zu Lenkmomentenstörungen und in einer Studie zur Kursführung bei schiefziehenden Bremsen abgeleitet: Bei impulsartigen Lenkmomentenänderungen tritt nach Krüger bereits nach 0,07 s eine Reaktion durch den Eigenreflex der Haltemuskulatur auf.²⁷² Neukum et al.²⁷³ belegen eine Erhöhung der Greifkräfte bei Lenkmomentenstörungen in Rechteckform nach bereits 0,08-0,12 s und eine kompensatorische Lenkeingabe ab ca. 0,18-0,22 s bzw. 0,2-0,25 s²⁷⁴ in einer weiteren Veröffentlichung. Bei nicht schlagartig spürbarer, rampenförmiger Erhöhung der Lenkmomentenstörung erfolgt eine Reaktion nach Neukum et al. hingegen erst nach ca. 0,7 s. Das Lenkmoment ist nach Neukum et al. die zentrale Feedback-Größe für den Fahrer. Die durch den Fahrer eingebrachte Lenkgeschwindigkeit zur Kompensation einer Störung ist dabei in etwa proportional zu der störungsinduzierten Lenkradgeschwindigkeit. Bei hohen störbedingten Lenkgeschwindigkeiten werden teilweise sogar stärkere Fahrerreaktionen im Vergleich zur Ausgangsstörung beobachtet, was zu einer destabilisierenden Überkompensation der Störung hinsichtlich der querdynamischen Kursführungsaufgabe führen kann.²⁷⁵

Bereits 1974 untersuchen Mitschke/Niemann²⁷⁶ die Fahrerreaktion infolge von schiefziehenden Bremsen mit dem Ziel, die gemessenen Lenkreaktionen des Fahrers über Koeffizientenbestimmung eines regelungstechnischen Fahrermodells zu erklären. Nach seinen Ergebnissen reagiert der Fahrer bereits nach 0,15 s auf Lenkmomentenänderungen, was mit den Ergebnissen von Neukum et al. vergleichbar ist. Die Reaktion auf Änderungen der Querschleunigung erfolgt nach 0,2 s und ab 0,3 s reagieren die Fahrer der Koeffizientenanalyse zufolge auch auf Änderungen des Gierwinkels. Donges²⁷⁷ untersucht die Reaktionszeit (Totzeit) des Fahrers ebenfalls durch die Methode der Anpassung von Parametern eines Fahrermodells an das real erfasste Fahrerverhalten während der Stabilisierung des Fahrzeugs. Als Ergebnis wird eine mittlere Totzeit von ca. 0,5 s genannt. Die Totzeit sei jedoch von der Zeit abhängig, die dem Fahrer zur Stabilisierung des Fahrzeugs zur Verfügung steht: Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten sinkt die Totzeit des Fahrers demnach deutlich ab, da die Stabilitätsreserve der Fahrzeugquerdynamik mit steigender Fahrgeschwindigkeit abnehme. Die bestimmte Totzeit von 0,5 s liegt wiederum deutlich unter der allgemeinen Angabe von 0,8-1 s durch Wallentowitz²⁷⁸ in Bezug auf Fahrerreaktionen zur Kompensation von Störungen in der Kurshaltung.

²⁷² Krüger (2000): Wenn intelligente Systeme intelligente Fahrer unterstützen, S. 1331ff

²⁷³ Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

²⁷⁴ Neukum et al. (2010): Wirkung diskreter Zusatzlenkmomente: Subjektive Bewertung

²⁷⁵ Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

²⁷⁶ Mitschke, Niemann (1974): Regelkreis Fahrer-Fahrzeug bei Störung durch schiefziehende Bremsen

²⁷⁷ Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

²⁷⁸ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

2.3.4 Anwendung von Fahrermodellen zur Bewertung der Fahrsicherheit

In den Untersuchungen von Donges²⁷⁹ und Wallentowitz²⁸⁰ wird deutlich, dass regelungstechnische Fahrermodelle dazu verwendet werden können, die Regelungstätigkeiten des Fahrers zur Kurshaltung nachzubilden und zu analysieren. In diesem Abschnitt wird daher auf die bekannten Ansätze zur mathematischen und logischen Beschreibung von Fahrermodellen eingegangen und ihre heutige Anwendbarkeit zur Bewertung der Fahrsicherheit diskutiert. Die mögliche Idealvorstellung formulieren Zomotor et al. 1977 als die Ermittlung von optimalen Fahreigenschaften des Fahrzeugs auf alleiniger Basis von „virtuellen Fahrern“.²⁸¹

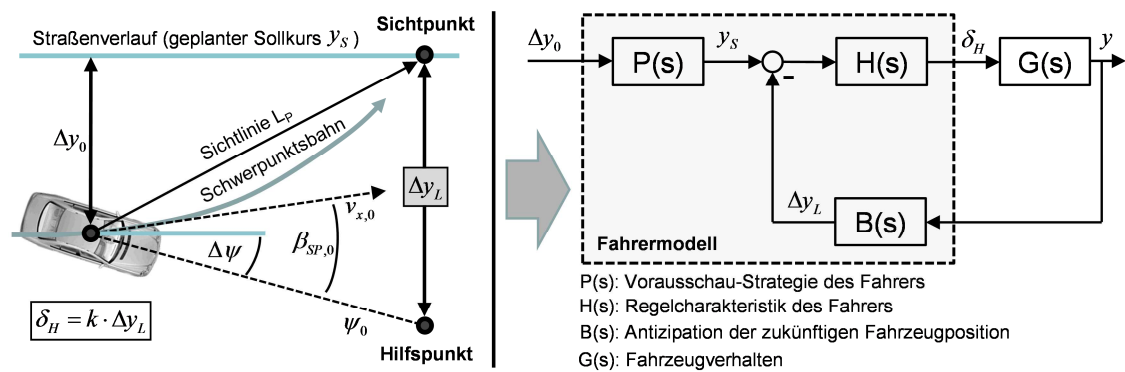


Bild 2.19 Fahrermodell zur Ausregelung von Querabweichungen nach Kondo²⁸² (links) und allgemeiner Basisregelkreis Mensch-Fahrzeug für sogenannte Vorausschaumodelle (rechts), z.B. nach Keen²⁸³ oder Plöchl/Edelmann²⁸⁴

Bild 2.19 (links) zeigt den frühen Ansatz eines regelungstechnischen Fahrermodells zur Beschreibung des Kursführungsverhaltens während der Ausregelung einer initialen Querabweichung Δy_0 nach Kondo 1953. Der virtuelle Fahrer schätzt nach diesem Modell die zukünftige Querabweichung des Fahrzeugschwerpunkts Δy_L in einer bestimmten Vorausschauweite L_p ab, indem er den Abstand zwischen der Verlängerung der Fahrzeug-X-Achse (Hilfspunkt) und dem Sichtpunkt im Abstand L_p auf dem gewählten Sollkurs y_{soll} prädiziert. Die resultierende Lenkradwinkeleingabe δ_H des Fahrers wird als proportional zur antizipierten Querabweichung Δy_L angenommen.

$$\delta_H = k \cdot \Delta y_L \quad (2.29)$$

²⁷⁹ Donges (2009): Fahrerhaltensmodelle

²⁸⁰ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

²⁸¹ Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

²⁸² Kondo (1953): Directional stability (when steering is added)

²⁸³ Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 6

²⁸⁴ Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 703

Das so gebildete Fahrermodell von Kondo ist in der Lage, einfache Kursabweichungen durch auftretenden Seitenwind auszuregeln. Alle Modelle, die auf einer Vorausschaustategie des Fahrers beruhen, können durch den Basisregelkreis aus Bild 2.19 (rechts) beschrieben werden. Hierbei repräsentiert das Übertragungsglied $P(s)$ nach Plöchl/Edelmann²⁸⁵ die Vorausschau-Strategie des Fahrers für die Führungsgröße y_s , $H(s)$ entspricht dem Regelverhalten des Fahrers zur Kompensation der Querabweichung mit der Stellgröße δ_H , $G(s)$ ist die Übertragungsfunktion des Fahrzeugs (Fahrzeugverhalten) und $B(s)$ steht für die Antizipation der zukünftigen Regelabweichung Δy_L oder weiteren Bewegungszuständen des Fahrzeugs - z.B. der Gierwinkelfehler $\Delta\psi$ oder der Krümmungsabweichung $\Delta\kappa$ bei Donges²⁸⁶ - auf Basis der aktuellen Istgrößen des Fahrzeugs. Diese Aufteilung entspricht im Wesentlichen der Einteilung der Handlungsebenen nach Donges aus Bild 2.17²⁸⁷ mit

- $P(s)$ = Kursführungsebene (Auswahl sicherer Führungsgrößen)
- $H(s) + B(s)$ = Stabilisierungsebene.

Für das Fahrermodell von Kondo ergibt sich nach Plöchl/Edelmann mit der Vorausschauzeit $T_p = L_p / v_x$ die regelungstechnische Entsprechung

$$P(s) = B(s) = e^{-T_p \cdot s}; H(s) = k. \quad (2.30)^{288}$$

Auf Basis des allgemeinen Regelkreises für Vorausschaumodelle aus Bild 2.19 (rechts) können beliebige Erweiterungen der Fahrermodelle durch eine Anpassung von $P(s)$, $H(s)$ und $B(s)$ abgeleitet werden. Die weitere Entwicklung der Fahrermodelle seit 1953 ist 2007 bereits von Plöchl/Edelmann und 2008 von Keen²⁸⁹ umfangreich zusammengetragen worden. Demnach beziehen sich die meisten Fahrermodelle auf die Ausregelung von seitlichen Kursabweichungen innerhalb eines Vorausschauintervalls.²⁹⁰ Die charakteristischen Übertragungsglieder des Vorausschaumodells werden in den 70er-Jahren unter zusätzlicher Einbeziehung des Gierwinkelfehlers $\Delta\psi$ oder der Bahnkrümmungsdifferenz $\Delta\kappa$ erweitert.^{291,292,293} Der mit Abstand stärkste Anteil im Regelverhalten des Fahrers $H(s)$ ist nach Donges durch die Gierwinkeldifferenz $\Delta\psi$ gegeben (P-Anteil), gefolgt

²⁸⁵ Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 702

²⁸⁶ Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

²⁸⁷ Donges (1982): Aspekte der Aktiven Sicherheit, S. 183ff

²⁸⁸ Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 703

²⁸⁹ Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 3ff

²⁹⁰ Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 702ff

²⁹¹ Donges (1978): A two-level model of driver steering behaviour

²⁹² McRuer et al. (1977): New results in driver steering control models, S. 381ff

²⁹³ McRuer et al. (1975): Measurement of driver-vehicle multiloop response properties with a single disturbance input, S. 490ff

von der Reaktion auf Krümmungsdifferenzen $\Delta\kappa$ (D-Anteil) und der Ausregelung von Querabweichungen Δy (I-Anteil).²⁹⁴ Nach Meyer-Tuve/Heißing bezieht der Fahrer die für ihn wichtigen Rückmeldungen zu 90 % über optische Signale.²⁹⁵ Das „2-Ebenen“-Fahrermodell von Donges²⁹⁶ unterscheidet in die bereits aus Bild 2.17 bekannten Handlungskategorien „Kursführung“ (Open-Loop-Vorsteuerung) und „Stabilisierung“ (Closed-Loop-Regelung) und wird in weiteren Forschungsarbeiten ergänzt, um beispielsweise das Lenkverhalten von Fahrern im nichtlinearen Bereich besser abbilden zu können oder Randbegrenzungen der Fahrbahn zu berücksichtigen. Hierzu wird u.a. eine Adaption des Fahrerverhaltens an das Fahrzeugverhalten vorgesehen²⁹⁷ und eine weitere Ebene zur Positionskontrolle eingeführt.²⁹⁸

In den Erweiterungen von Fahrermodellen aus den 80er- und 90er-Jahren werden gleichzeitig aber auch die Schwierigkeiten bei der exakten Nachbildung der Regeltätigkeiten des Fahrers deutlich. Diese bestehen in der Anpassung des Fahrerverhaltens an ein variierendes und teilweise nichtlineares Fahrzeugverhalten auf der Stabilisierungsebene und in der Berücksichtigung von Entscheidungshandlungen des Fahrers auf der Kursführungsebene. Fahrer erlernen das Lenkverhalten nach McAdam im linearen Bereich²⁹⁹ und adaptieren ihre Regeltätigkeiten an das Fahrzeugverhalten, siehe Ungoren/Peng.³⁰⁰ Diese Adaption entspricht nach Ungoren/Peng in der Regelungstechnik einer Invertierung des Fahrzeugverhaltens $G(s)$ in der Übertragungsfunktion des Reglers $H(s)$ und einer verbesserten Antizipation des zukünftigen Fahrzeugverhaltens in $B(s)$ durch Kenntnis des tatsächlichen Fahrzeugverhaltens. Beispiele für nichtlineare Fahrzeugregler sind neben Bösch³⁰¹ auch bei Mayr/Freund³⁰² oder Vögel et al.³⁰³ zu finden. Eine Möglichkeit, sowohl Nichtlinearitäten zu berücksichtigen als auch menschliche Entscheidungsprozesse nachzubilden, sind nach Plöchl/Edelmann sogenannte Fuzzy Logic Controller (FLC).³⁰⁴ Durch FLC werden einfache „wenn – dann“-Verknüpfungen erstellt und hiermit versucht, menschliches Denken und Entscheiden nachzubilden.^{305,306} Auf diese Weise können allgemeine Regeln für die Kursführung oder Stabilisierung formuliert werden, z.B. zurückhaltendere Lenktätigkeiten bei hohen Fahrgeschwindig-

²⁹⁴ Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

²⁹⁵ Meyer-Tuve, Heißing (2007): Ermittlung quantifizierbarer Bewertungen zur Querdynamik

²⁹⁶ Donges (1978): A two-level model of driver steering behaviour

²⁹⁷ Bösch (1991): Der Fahrer als Regler

²⁹⁸ Lugner, Plöchl (1995): Additional 4WS and Driver Interaction, S. 639ff

²⁹⁹ McAdam (1981): Optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, S. 393ff

³⁰⁰ Ungoren, Peng (2005): An adaptive lateral preview driver model, S. 245ff

³⁰¹ Bösch (1991): Der Fahrer als Regler

³⁰² Mayr, Freund (1992): Design of nonlinear path control in automated vehicle guidance, S. 613ff

³⁰³ Vögel et al. (2003): An optimal control approach to real-time vehicle guidance, S. 84ff

³⁰⁴ Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 712ff

³⁰⁵ Zadeh et al. (1997): Neural network and fuzzy logic applications to vehicle systems, S. 132ff

³⁰⁶ Zeyada et al. (2000): Driver modeling using fuzzy logic controls

keiten³⁰⁷ oder die Wahl maximaler Längsverzögerungen.³⁰⁸ Bei Xi/Qun wird 1994 durch FLC ein Regelansatz mit 49 sich selbst organisierenden Regeln vorgestellt.³⁰⁹ Seit den 90er-Jahren werden auch neuronale Netze (NN) zur Eignung für Fahrermodelle untersucht, z.B. von Kageyama et al.³¹⁰ oder Kraiss/Küttelwesch³¹¹, und erzielen nach Kageyama eine befriedigende Annäherung an reale Fahrerhandlungen in Kreisfahrten. Darüber hinaus werden Kombinationen von verschiedenen Regelungskonzepten in „hybriden Fahrermodellen“ vorgenommen, siehe Jürgensohn.³¹² Die Verwendung von FLC oder NN umfasst hierbei i.d.R. die Abbildung von regelbasierten Prozessen auf der Kursführungsebene zur Verarbeitung von Umgebungsinformationen.^{313,314,315,316} Für die Nachbildung des Closed-Loop-Regelkreises zur Stabilisierung des Fahrzustandes haben sich hingegen nach Donges (2009) die Methoden der klassischen Regelungstechnik bewährt.³¹⁷

Die Anwendbarkeit von Fahrermodellen ist im Hinblick auf das von Zomotor ausgegebene Ziel der Optimierung des Fahrzeugverhaltens auf Basis virtueller Testfahrer umstritten. So kritisiert Jürgensohn 1997 den Umstand, dass Fahrermodelle in der Fahrzeugentwicklung praktisch keine Verwendung fänden.³¹⁸ Zudem sei, ebenfalls nach Jürgensohn, der Testfahrer für die Subjektivbeurteilung des Fahrverhaltens kaum ersetzbar und es könne kein einheitliches Fahrermodell für alle Anwendungen geben.³¹⁹ Plöchl/Edelmann verweisen 2007 auf das Missverhältnis zwischen dem hochgradig nichtlinearen Fahrzeugverhalten und den internen Vorausschaumodellen der Fahrermodelle und beschreiben die Simulation des Closed-Loop-Verhaltens im Grenzbereich daher als „unmögliche Herausforderung“.³²⁰ Auch Meyer-Tuve/Heißing³²¹ sehen die Darstellung des Grenzbereichs 2007 als problematisch an, wohingegen Lin et al.³²² 2004 die gegebene Möglichkeit beschreiben, die Fahrbarkeit und Fahrsicherheit eines Fahrzeugs anhand von Fahrermodellen beschreiben zu können. Hierfür sprechen ebenfalls

³⁰⁷ Hessburg, Tomizuka (1994): Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance, S. 55ff

³⁰⁸ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 213ff

³⁰⁹ Xi, Qun (1994): Driver-vehicle-environment closed-loop simulation of handling and stability using fuzzy control theory, S. 172ff

³¹⁰ Kageyama et al. (1999): Driver's Control Algorithm using Neural Network Modeling

³¹¹ Kraiss, Küttelwesch (1990): Teaching neural networks to guide a vehicle

³¹² Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 177ff

³¹³ Cheng, Fujioka (1997): A hierarchical driver model

³¹⁴ Kageyama, Pacejka (1991): On a new driver model with fuzzy control, S. 314ff

³¹⁵ Kageyama et al. (1999): Driver's Control Algorithm using Neural Network Modeling

³¹⁶ Song et al. (2000): Cognitive and hybrid model of human driver, S. 1ff

³¹⁷ Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

³¹⁸ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 11

³¹⁹ Willumeit, Jürgensohn (1999): Fahrermodelle - ein kritischer Überblick

³²⁰ Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 724

³²¹ Meyer-Tuve, Heißing (2007): Ermittlung quantifizierbarer Bewertungen zur Querdynamik

³²² Lin et al. (2004): Stability and Performance Studies of Electronic Chassis Control

einige in der jüngeren Vergangenheit durchgeführte Studien, die auf Basis der Verwendung von Fahrermodellen Rückschlüsse auf die Fähigkeiten von Normalfahrern in der Stabilisierungsebene zulassen und somit potentiell auch Gestaltungshinweise für ein sicheres Fahrzeugverhalten liefern können:

In der Studie von Keen³²³ wird 2008 zur Nachbildung der Lenktätigkeiten eines Probandenkollektivs im VDA-Ausweichtest ein Ansatz aus einem Vorausschaumodell mit mehreren Referenzpunkten und einem internen Fahrzeugmodell des Fahrers verwendet. Die Parameter des Modells werden für jeden Fahrer anhand der real erfassten Lenktätigkeiten bestimmt. Das Ergebnis zeigt eine hohe Streubreite der Lenktätigkeiten und ermittelten Modellparameter für verschiedene Fahrer. Die Lenktätigkeiten eines einzelnen Fahrers folgen nach Keen hingegen einem individuellen Muster und das „Fähigkeitslevel“ eines Fahrers lasse sich vor allem durch das Verständnis des nichtlinearen Bereiches des Fahrzeugverhaltens ausdrücken. Diese Aussage deckt sich mit einer Studie zum doppelten Fahrspurwechsel von Müller-Beßler et al.³²⁴ 2008, der zufolge Normalfahrer keine bleibenden Erfahrungen im nichtlinearen Bereich des Fahrzeugverhaltens besitzen. Die im linearen Bereich erlernten Fahrfertigkeiten sind nach Müller-Beßler et al. zwar tendenziell richtig, eilen der Fahrzeugbewegung aber zu stark nach, während sogenannte „Profifahrer“ ein temporäres Übersteuern des Fahrzeugs mit gezielten und schnellen Lenkreaktionen stabilisieren können. Ein Fahrzeug sei für Normalfahrer daher umso besser beherrschbar, je eher das Fahrverhalten im Grenzbereich den Zusammenhängen aus dem linearen Bereich ähnelt. Ein System gilt generell als besser vorhersehbar durch den Menschen, wenn die Ordnung des Systems möglichst klein ist bzw. im Idealfall ein rein lineares System vorliegt.³²⁵

Wenzel et al.³²⁶ untersuchen 2005 ebenfalls den doppelten Fahrspurwechsel auf Basis eines mathematischen Fahrermodells, um den Nutzen von einer Stabilitätskontrolle durch Überlagerungslenkung (AFS) nachzuweisen. Ohne AFS treten in Interaktion mit dem virtuellen Fahrer hierbei Schwimmwinkel $\beta_{SP,max}$ bis zu 7° auf, mit aktiver Stabilisierung hingegen nur maximal 3° Schwimmwinkel. Gleichzeitig wird der Lenkbedarf des virtuellen Testfahrers durch AFS reduziert. Bereits 1995 wurde mittels eines erweiterten „2-Ebenen“ Fahrermodells das Stabilisierungspotenzial einer Hinterradschräglaufrückwinkelregelung (HSR) in μ -split Bremsung und im ISO-Spurwechsel nachgewiesen. Dem Fahrermodell gelingt es mit aktiver HSR trotz dominantem Fahrereinfluss besser, der Solltrajektorie zu folgen.³²⁷ In einer weiteren Studie zur Analyse des Lenkverhaltens

³²³ Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 63ff

³²⁴ Müller-Beßler et al. (2008): Fahrzeugbewertung im doppelten Spurwechsel, S. 358ff

³²⁵ Schmidtke, Bernotat (1993): Ergonomie, 3. Auflage

³²⁶ Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

³²⁷ Lugner, Plöchl (1995): Additional 4WS and Driver Interaction, S. 639ff

von Normalfahrern in Notsituationen werden die Probanden mit einem plötzlich vor dem Fahrzeug auftauchenden Hindernis konfrontiert.³²⁸ Das Hindernis taucht entweder weit vor dem Fahrzeug oder in kurzer Distanz auf. Die erfassten Lenktätigkeiten werden anschließend dazu verwendet, die Modellparameter Vorausschauzeit T_p in $P(s)$ und Verstärkungsfaktor k in $H(s)$ des verwendeten Fahrermodells zu bestimmen. Es wird festgestellt, dass bei kurzer Distanz zum Hindernis höhere Verstärkungsfaktoren k_i und kürzere Vorausschauzeiten $T_{p,i}$ auftreten als in „normaler“ Fahrt ohne auftretendes Hindernis. Tritt das Hindernis in einem größeren Abstand vor dem Fahrzeug auf, bleiben die Modellparameter hingegen nahezu konstant. Diese Studie von Nagai et al. belegt neben der bereits aus 2.3.3 bekannten Abhängigkeit der Reaktionszeit vom Aufforderungsgrad einer Situation auch eine ansteigende Intensität der Stabilisierungshandlungen von Fahrern in kritisch empfundenen Ausweichsituationen.

Die von Plöchl/Edelmann³²⁹ genannten Stabilisierungsgrenzen des Fahrers, beschrieben durch seine Reaktionszeit, den Vorausschaubereich und die Korrekturstärke der Lenkeingaben variieren offensichtlich mit den individuellen Fähigkeiten, Testbedingungen und Umgebungsfaktoren. Darüber hinaus ist es möglich, eine relative Verbesserung der Stabilisierbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch aktive Lenksysteme wie AFS oder HSR im Vergleich mit ungeregelten Fahrwerken nachzuweisen.^{330,331} Es existiert jedoch kein anerkanntes Fahrermodell oder ein virtuelles Probandenkollektiv, auf dessen Basis die angestrebte Ableitung von Akzeptanzgrenzen für die charakteristischen Bewegungskennwerte für Normalfahrer in Brems- und Ausweichsituationen gelingen könnte.

2.4 Fazit

In diesem Kapitel wurde der aktuelle Stand der Forschung auf dem Themengebiet der objektiven Bewertung von Fahrsicherheit im Hinblick auf die Möglichkeit zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen zusammengetragen. Dem Ergebnis nach entspricht es heute dem Stand der Technik in der Fahrzeugentwicklung, das Fahrzeugverhalten messtechnisch zu erfassen und anhand von charakteristischen Kenngrößen zu beschreiben.³³² Die Testverfahren - wie z.B. das Bremsen in der Kurve, das Bremsen auf μ -split oder der ISO-Spurwechseltest - wurden weitestgehend standardisiert und in Normungen überführt.^{333,334,335} Die geeigneten Kennwerte zur Bewertung der Fahrstabilität wurden in

³²⁸ Nagai et al. (1997): Application of genetic algorithm to analysis of driver's behaviour in collision avoidance, S. 626ff

³²⁹ Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 727

³³⁰ Lugner, Plöchl (1995): Additional 4WS and Driver Interaction, S. 639ff

³³¹ Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

³³² Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

³³³ ISO 7975 (2006): Braking in a turn, Open-loop test method (third edition)

den letzten ca. 40 Jahren durch ihre Korrelation mit Subjektivbeurteilungen von Testfahrern bestimmt. Zur Beurteilung der Stabilität in Bremsmanövern hat sich heute vor allem die Giergeschwindigkeitsabweichung vom stationären Ausgangszustand eine Sekunde nach Bremsbeginn $\Delta\dot{\psi}_{1s}$ oder deren maximale Abweichung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ durchgesetzt. Eine Auswertung der Querbeschleunigungsabweichung $\Delta a_{y,1s/\max}$ und des Schwimmwinkels $\beta_{SP,1s/\max}$ wird ebenfalls empfohlen. Auch in Spurwechseltests und in Ausweichmanövern ist der maximale Schwimmwinkel $\beta_{SP,\max}$ ein anerkanntes Maß für die Stabilität des Fahrzeugverhaltens. Die durchgeführte Recherche zeigt jedoch, dass im Gegensatz zur Standardisierung der Testverfahren keine allgemeingültigen oder normierten Akzeptanzgrenzen für die bekannten charakteristischen Bewegungskenngrößen abgeleitet wurden. Auch in der Literatur sind nur wenige und teilweise deutlich voneinander abweichende Empfehlungen für die Definition von Akzeptanzgrenzen der Bewegungskenngrößen enthalten. Die einzigen bekannten Anhaltswerte für das zulässige Gierverhalten in Standardfahrmanövern liefern 1975 Fiat und 1987 Otto. Demnach soll die Giergeschwindigkeit in Kurvenbremsungen maximal um 50 % vom Ausgangswert abweichen³³⁶ und die Gierbeschleunigung einen „Gefährlichkeitsgrenzwert“ von $5^\circ/\text{s}^2$ Gierbeschleunigung während Lastwechsels nicht überschreiten.³³⁷ Die veröffentlichten Akzeptanzgrenzen für den maximalen Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt sind unterschiedlich und variieren zwischen $5\text{--}20^\circ$.^{338,339,340,341,342} Die Eignung des Schwimmwinkels im Fahrzeugschwerpunkt als objektive Bewegungskenngröße kann aufgrund des fehlenden eindeutigen Bezugs zum Fahrzustand des Fahrzeugs jedoch angezweifelt werden.

Einzig für das in den USA und Kanada zulassungsrelevante Open-Loop-Testverfahren *Sine with dwell* werden in der FMVSS No. 126³⁴³ aufgrund der Notwendigkeit von definierten Prüfkriterien direkt auch die Akzeptanzgrenzen zum Nachweis der Gierstabilität genannt: Die Gierrate muss eine Sekunde bzw. 1,75 Sekunden nach Beendigung der Lenkeingaben auf weniger als 35 % bzw. 20 % der maximalen Gierrate während des Manövers abgesunken sein. Zusätzlich muss das Fahrzeug während des Manövers mindestens einen definierten Seitenversatz von 1,22 m (bei PKW) erzielen. Aufgrund der

³³⁴ ISO 14512 (1999): Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction

³³⁵ ISO 3888-1 (1999): Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change

³³⁶ Fiat (1975): Proposal for Straight-Line and In-A-Turn Braking Test Procedures

³³⁷ Otto (1987): Lastwechselreaktionen von PKW bei Kurvenfahrt, S. 43

³³⁸ Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

³³⁹ Rompe et al. (1980): Erprobung eines Testverfahrens für das Bremsen in der Kurve

³⁴⁰ von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 14

³⁴¹ Witte (1995): Stabilisierung der Gierbewegung in kritischen Fahrzuständen

³⁴² Rundkuist (1974): Steerability During Emergency Braking

³⁴³ NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-1ff

fehlenden Standardisierung von Akzeptanzgrenzen in den übrigen Testverfahren kann zum heutigen Zeitpunkt trotz der umfangreichen Bemühungen zur Objektivierung des Fahrzeugverhaltens kein eindeutiger objektiver Nachweis der Fahrsicherheit eines Fahrzeugs abgeleitet werden.

Ein vielversprechender Ansatz zur Ermittlung von Akzeptanzgrenzen wird in der Methodik zur Störbeurteilung von Gierstörungen infolge des Falschverhaltens von elektronischen Fahrzeugkomponenten nach Neukum/Krüger identifiziert.³⁴⁴ Die angewandte Störbeurteilungsskala erlaubt einen direkten Rückschluss auf potentielle Gefährlichkeitsgrenzen und wurde bereits erfolgreich eingesetzt, um subjektive Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen infolge von Lenksystemstörungen an Vorder- und Hinterachse abzuleiten.^{345,346} Die genannten Akzeptanzgrenzen weichen jedoch stark voneinander ab und die klassifizierte Bewertungsskala wurde bisher nicht zur Beurteilung des Grundfahrzeugverhaltens in Brems- oder Ausweichmanövern verwendet. Unter Berücksichtigung der Begrifflichkeiten aus dem Bereich der Aktiven Sicherheit ist ein objektiv sicheres Fahrerergebnis dann gegeben, wenn es dem Fahrer gelingt, einen sicheren Sollkurs zu wählen und das Fahrzeug im Anschluss auf diesem Sollkurs zu stabilisieren. Gelingt dies nicht, wird in der Unfallstatistik von einem „Fahrerunfall“ gesprochen, auf den ca. 40 % aller Unfälle mit Todesopfern entfallen. Diese Statistik schließt ein weiteres Potential hinsichtlich der Unfallreduzierung durch eine verbesserte Anpassung des Fahrzeugverhaltens an die Fähigkeiten von Normalfahrern nicht aus. Es sind jedoch keine Statistiken bekannt, die eine Korrelation des objektiven Fahrzeugverhaltens mit der realen Unfalldisposition erlauben.³⁴⁷ Zudem existiert keine Studie, in der auf Basis des objektiven Kurshaltevermögens von Normalfahrern geprüft wird, bis hin zu welchen Grenzen der charakteristischen Bewegungskenngrößen noch ein sicheres Fahrerergebnis erzielt wird. Dies liegt vor allem an der Annahme, eine sichere Subjektivbeurteilung des Fahrzeugverhaltens sei in jedem Fall gleichbedeutend mit einer objektiv sicheren Bewältigung der Fahraufgabe.³⁴⁸

Weiterhin wurden die bestehenden Ersatzmodelle des Zusammenwirkens zwischen Mensch und Fahrzeug aufgezeigt. Dem gängigen Verständnis nach, handelt es sich bei der Fahrzeugführung um eine Mischform aus bewussten Entscheidungshandlungen zur Wahl sicherer Führungsgrößen und der unbewussten Stabilisierung des Fahrzeugverhaltens auf der sogenannten Stabilisierungsebene.^{349,350} Die Handlungen zur Stabilisierung

³⁴⁴ Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 303

³⁴⁵ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S.10f

³⁴⁶ Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

³⁴⁷ ISO 17288-1 (2002): Free-steer behaviour – Part 1: Steering-release open-loop test method

³⁴⁸ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 3

³⁴⁹ Donges (1982): Aspekte der Aktiven Sicherheit, S. 183

des Fahrzeugs werden dabei vom Fahrer im linearen Bereich des Fahrverhaltens erlernt und in ihren Grundmustern auch in kritischen Situationen nicht variiert.^{351,352,353} Die Reaktionszeit und die Reaktionsintensität der Lenkreaktion von Normalfahrern scheinen jedoch nach den zusammengetragenen Veröffentlichungen stark vom Aufforderungsgrad der Situation, von der Art des Reizes selbst und von persönlichen Faktoren des Fahrers abhängig zu sein. Ebenso wird Fahrern eine individuell stark variierende Fahrfertigkeit zugeschrieben.^{354,355} Eine hohe Fahrfertigkeit zeichnet sich durch kurze Reaktionszeiten, schnelle stabilisierende Lenkbewegungen und die Kenntnis des nichtlinearen Fahrverhaltens aus.^{356,357}

Heute werden neben klassischen Fahrversuchen vereinzelt auch Fahrermodelle angewandt, um weitere Erkenntnisse über die Regeltätigkeiten des Fahrers zu erlangen und die Beurteilung der Fahrsicherheit durch virtuelle Testfahrer vorzunehmen. Mit Ausnahme der Abbildung von Fahrerhandlungen im Grenzbereich, siehe zusammenfassende Darstellung von Plöchl/Edelmann³⁵⁸, wird die Möglichkeit nachgewiesen, das individuelle Lenkverhalten von Normalfahrern beispielsweise im VDA-Ausweichtest durch heutige Fahrermodelle annähernd genau abzubilden, siehe Keen³⁵⁹. Oft wird jedoch versucht, ein einziges repräsentatives Fahrermodell abzuleiten, wobei die bekannte individuelle Streubreite der Fahrfertigkeit von Normalfahrern vernachlässigt wird. Durch eine individuelle Parametrierung auf Basis realer Probandenkollektive wie von Keen 2008 könnte es zukünftig gelingen, die Fahrstabilität eines Fahrzeugs auch durch „virtuelle Probandenkollektive“ zu bewerten. Für eine Aussage zur Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern oder von hohen Schwimmwinkeln in Ausweichtests kann heute jedoch auf kein geeignetes, virtuelles Fahrerkollektiv zurückgegriffen werden. Eine Studie zur Bewertung der Beherrschbarkeit von Normalfahrern in Brems- und Ausweichtests kann daher im Rahmen dieser Arbeit nur auf Basis eines realen Probandenkollektivs erfolgen.

³⁵⁰ Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

³⁵¹ McAdam (1981): Optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, S. 393ff

³⁵² Müller-Beßler et al. (2008): Fahrzeugbewertung im doppelten Spurwechsel, S. 358ff

³⁵³ Neukum et al. (2001): Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften?

³⁵⁴ Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 248f

³⁵⁵ Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop

³⁵⁶ Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 248f

³⁵⁷ Müller-Beßler et al. (2008): Fahrzeugbewertung im doppelten Spurwechsel, S. 358ff

³⁵⁸ Plöchl, Edelmann (2007): Driver models in automobile dynamics application, S. 724

³⁵⁹ Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control

3 Versuchskonzept

3.1 Zielsetzung

Unter Berücksichtigung der bestehenden Erkenntnisse zur objektiven Beurteilung von Fahrsicherheit soll eine Testmethodik abgeleitet werden, die es erlaubt, den bisher nicht bekannten Zusammenhang zwischen den charakteristischen Bewegungskenngrößen aus Kapitel 2.2 und dem tatsächlichen Kurshaltevermögen von Normalfahrern in Brems- und Ausweichtests herzustellen. Das Ziel hierbei ist es, die charakteristischen Open-Loop-Kennwerte des Fahrzeugverhaltens in Brems- und Ausweichtests $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$ und $\beta_{SP,1s/\max}$ zu variieren und auf Basis der Testergebnisse Vorschläge für Akzeptanzgrenzen hinsichtlich einer objektiv sicheren Beherrschbarkeit durch Normalfahrer abzuleiten. Hierzu werden zunächst geeignete Versuchs-Hypothesen aufgestellt und das benötigte Versuchskonzept sowie die benötigten Versuchsinstrumente zur Prüfung dieser Hypothesen in Brems- und Ausweichtests abgeleitet.

3.2 Hypothesen

Tabelle 3.1 fasst die untersuchten Hypothesen und Fragestellungen zur Beherrschbarkeit von Gierstörungen, Querschleunigungsabweichungen und hohen Schwimmwinkeln zusammen. Es wird zunächst eine hochsignifikante Korrelation zwischen der subjektiven Beherrschbarkeit und der Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$ angenommen. Zusätzlich wird vermutet, dass die subjektive Beherrschbarkeit im Vergleich zu dem tatsächlichen Kurshaltevermögen deutlich konservativer, d.h. kritischer ausfällt.³⁶⁰ Aufgrund der empfohlenen Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen infolge von Hinterradlenk-eingriffen³⁶¹ zwischen 7,8°/s und 12°/s und ersten kritischen Subjektivbeurteilungen von Vertikaldynamikstörungen³⁶² ab 8°/s werden erste Fahrstreifenverletzungen in Bremsmanövern im Bereich zwischen ca. 5-10°/s Gierstörung erwartet. Die Kursabweichung sollte hierbei der Erwartung nach mit zunehmender Gierstörung signifikant ansteigen und somit ein geeigneter Indikator für die Schwierigkeit der Aufgabenbewältigung sein. Da bisher veröffentlichte Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen deutlich von der Fahrgeschwindigkeit abhängig sind, siehe Kapitel 2.2.1, werden mit steigender Fahrgeschwindigkeit sowohl eine signifikant ansteigende Kursabweichung als auch eine signifikant verschlechterte Subjektivbeurteilung angenommen. Dementsprechend wer-

³⁶⁰ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 3

³⁶¹ Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

³⁶² Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, S. 92

den bei erhöhter Fahrgeschwindigkeit erste Fahrstreifenverletzungen bereits bei niedrigeren Gierstörungen erwartet. Für die Abhängigkeit der Subjektivbeurteilung und des Kurshaltevermögens von der Querschleunigungsabweichung wird keine signifikante Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit angenommen, siehe Ergebnisse von Neukum et al. und Wesp. Ebenfalls kann in bisherigen Studien zur Beurteilung von Gierstörungen kein Gewöhnungseffekt oder Reihenfolgeeffekt der subjektiven Beurteilung nachgewiesen werden.^{363,364} Der ausbleibende Gewöhnungseffekt ist auch für das objektive Kurshaltevermögen zu prüfen.

Tabelle 3.1 Versuchs-Hypothesen zur subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit von Gierstörungen, Querschleunigungsabweichungen und Schwimmwinkeln in Brems- bzw. Ausweichtests

Wert	Kategorie	Hypothesen
$\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$	Subjektiv	$\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$ zeigt beste und hochsignifikante Korrelation
		Subjektivkriterium ist konservativer als ein Kurshaltekriterium
	Kurshaltung	Erste Fahrstreifenverletzungen zwischen 5-10 % $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$
		Kursabweichung steigt mit $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$ eindeutig an
	Fahrgeschwindigkeit	Höhere Fahrgeschwindigkeit -> größere Kursabweichung
		Höhere Fahrgeschwindigkeit -> schlechteres Subjektivurteil
		" -> Fahrstreifenverletzungen bei niedrigeren $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max}$
	Fahrmanöver	Signifikante Unterschiede im Subjektivurteil
		Signifikante Unterschiede im Kurshaltevermögen
	Gewöhnungseffekt	keine Gewöhnungseffekte über Versuchsanzahl vorhanden
$\Delta a_{y,1s/\max}$	Fahrgeschwindigkeit	Höhere Fahrgeschwindigkeit -> identische Kursabweichung
		Höhere Fahrgeschwindigkeit -> identische Subjektivbeurteilung
		" -> Erste Fahrstreifenverletzungen bei identischen $\Delta a_{y,1s/\max}$
$\beta_{SP/HA,\max}$	Subjektiv	$\beta_{SP/HA,\max}$ zeigen höchste und hochsignifikante Korrelation
	Kurshaltung	Eingeschränktes Kurshaltevermögen ab 5-10° $\beta_{SP/HA,\max}$

In Bezug auf die Unterscheidung der Subjektivbeurteilung zwischen verschiedenen Fahrmanövern kann aus der Literatur keine eindeutige Hypothese abgeleitet werden. Während Neukum et al. eine identische Bewertung von Gierstörungen in Geradeaus- und Kurvenfahrt angeben³⁶⁵, werden in anderen Studien kritischere Bewertungen in Kurvenfahrt^{366,367,368} oder kritischere Bewertungen in Geradeausfahrt beobachtet.^{369,370}

³⁶³ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 8

³⁶⁴ Wesp et al. (2009): Einfluss der Systemauslegung hinterachsgelenkter Fahrzeuge

³⁶⁵ Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenkensystems

³⁶⁶ Schmidt et al. (2007): Auswirkung haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug-System

³⁶⁷ Switkes (2006): Handwheel force feedback with lanekeeping assistance

³⁶⁸ Switkes et al. (2007): Driver response to steering torque disturbances

³⁶⁹ Amberkar et al. (2000): Diagnostic development for an electric power steering system

³⁷⁰ Schmidt (2007): Wann spürt der Fahrer überhaupt? Der Einfluss des Fahrmanövers auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten als haptische Signale im Fahrzeug

Im Rahmen dieser Arbeit wird aufgrund der unterschiedlichen Beanspruchung des Fahrers während der Kurshaltungsaufgabe in Geradeaus- und Kurvenbremsung die Hypothese einer signifikant unterschiedlichen Subjektivbeurteilungen und Kursabweichungen gewählt.

In Ausweichtests wird eine hochsignifikante Korrelation der Subjektivbeurteilung mit dem auftretenden Schwimmwinkel im Fzg.-Schwerpunkt angenommen. Auf Basis der bekannten Grenzwertempfehlungen aus der jüngeren Vergangenheit^{371,372} wird eine Einschränkung des Kurshaltevermögens von Normalfahrern in Ausweichsituationen zwischen 5-10° Schwimmwinkel vermutet. Heutige Reifen erreichen ihr Kraftschlussmaximum im Bereich zwischen ca. 5-10° Schräglaufwinkel.^{373,374} Dabei entspricht der Schräglaufwinkel an der Hinterachse – ohne zusätzliche Lenkeingriffe und unter Vernachlässigung von Vor- und Nachspur – im Einspurmodell dem Schräglaufwinkel der Hinterräder. Werden HA-Schwimmwinkel β_{HA} im Bereich zwischen 5-10° erzielt, kann das Kraftschlussmaximum der Hinterachse also überschritten werden und ein instabiler Fahrzustand resultieren. Daher wird in dieser Arbeit ebenfalls die Eignung des maximalen HA-Schwimmwinkels zur Erklärung von Subjektivbeurteilungen und des Kurshaltevermögens untersucht.

3.3 Ableitung der Testmethodik

Die Testmethodik zur Ermittlung des objektiven Kurshaltevermögens von Normalfahrern in Abhängigkeit der charakteristischen Bewegungskennwerte besteht in der Variation des Grundfahrzeugverhaltens durch eine Hinterradverstellung. In den durchgeführten Brems- und Ausweichtests wird geprüft, ob infolge der jeweiligen Verstellungsausprägung noch von einer sicheren Kursführung ausgegangen werden kann. Zur Nachweisbarkeit einer sicheren Kursführung werden Pylonen-markierte Fahrgassen definiert, die durch Normalfahrer sicher, d.h. ohne Fahrstreifenverletzung, bewältigt werden sollen. Die Auswahl der Hinterradverstellung erfolgt aufgrund des fahrphysikalisch vergleichbaren Zusammenhangs von Giergeschwindigkeitsabweichungen infolge einer Hinterradverstellung oder eines Lastwechsel- bzw. Bremsvorgangs in Kurvenfahrt, siehe Validierung in Kapitel 3.4. Die Testmanöver, Bewertungskriterien und benötigten Versuchsinstrumente dieser Arbeit ergeben sich aus den Anforderungen zur Prüfung der Versuchshypothesen aus Tabelle 3.1.

³⁷¹ Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

³⁷² von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 14

³⁷³ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

³⁷⁴ Schmid, Förtschl (2009): Vom realen zum virtuellen Reifen – Reifenmodellparametrierung, S. 188ff

3.3.1 Testmanöver zur Bewertung von Gierstörungen

1. Manöverdefinition:

Die erforderlichen Fahrmanöver zur Bewertung der Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern werden aus der systematischen Variation der möglichen stationären Ausgangsfahrzustände und einer anschließenden Bremsbehandlung nach Bild 3.1 abgeleitet. Aus einem zunächst stationären Fahrzustand in Geradeaus- oder Kurvenfahrt kann eine Gierstörung entweder an einen Bremsvorgang gekoppelt oder für die Testperson überraschend (ohne gleichzeitige Bremsung) aufgeschaltet werden. Aufgrund der Annahme einer abweichenden Beanspruchung des Fahrers in Geradeaus- und Kurvenfahrt werden bei einer identischen Ausgangsfahrgeschwindigkeit von 80 km/h alle vier der möglichen Varianten

- 1. Geradeausbremsung ; 2. ungebremste Geradeausfahrt
- 3. Kurvenbremsung; 4. ungebremste Kurvenfahrt

durchgeführt.

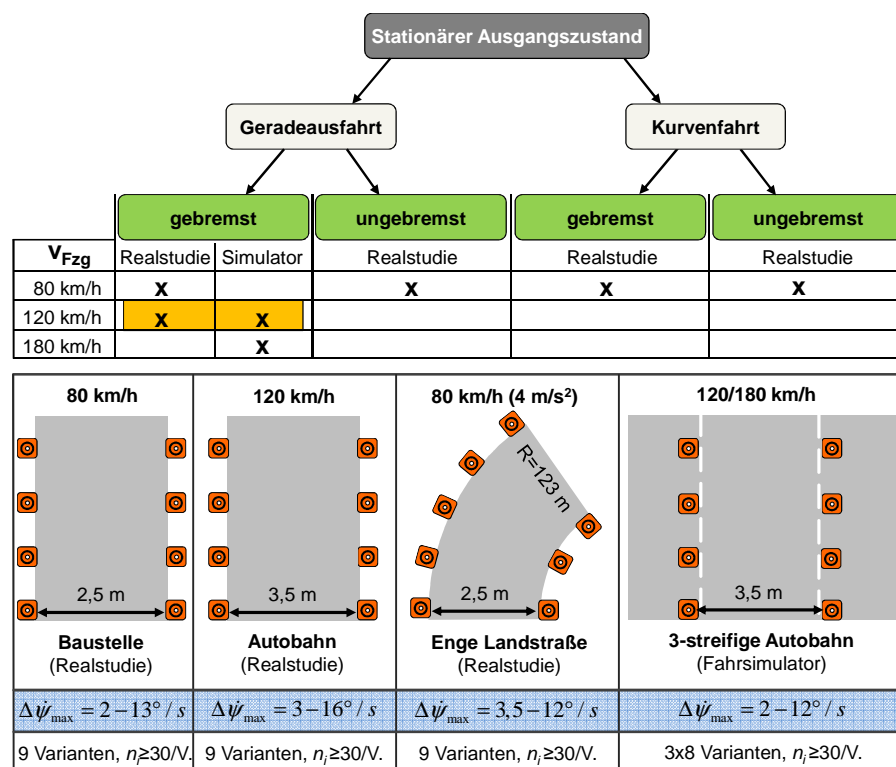


Bild 3.1 Ableitung der notwendigen Testmanöver zur Bewertung der Gierstörungen-Hypothesen

Eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 80 km/h wird üblicherweise im Bereich von Autobahnbaustellen³⁷⁵, aber auch im Bereich von kurvenreichen Strecken auf Überland-

³⁷⁵ Bundesministerium für Verkehr (2001): Sicherung von Arbeitsstellen (RSA-95)

straßen vorgefunden und stellt daher eine geeignete Fahrgeschwindigkeit zur Prüfung des Kurshaltevermögens auf verengten Fahrbahnstreifen dar. Darüber hinaus werden Geradeausbremsungen aus 120 km/h und 180 km/h durchgeführt, um die vermutete Abhängigkeit des Kurshaltevermögens und der Subjektivbeurteilung von der Fahrgeschwindigkeit bewerten zu können. Die Testmanöver mit Ausgangsfahrgeschwindigkeiten von 80-120 km/h finden in einer Realstudie unter Verwendung eines Versuchsfahrzeugs mit aktiver Hinterradverstellung statt, siehe Kapitel 3.4. Die Beherrschbarkeit von Gierstörungen im Bereich einer erhöhten Fahrgeschwindigkeit von 120 km/h wird hingegen aus Sicherheitsgründen nur am dynamischen Fahrsimulator der Daimler AG untersucht. Zum Nachweis der Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse aus der Fahrsimulatorstudie auf die real durchgeführten Bremsmanöver findet eine Wiederholung der identischen Geradeausbremsungsvarianten aus 120 km/h auch am Fahrsimulator statt. Die benötigten Open-Loop-Giergeschwindigkeitsabweichungen $> 10^\circ/\text{s}$ können durch die verwendete Hinterradverstellung in allen Testmanövern erzielt werden. Die Auslösung eines Lenkeingriffs der Hinterradverstellung wird zu diesem Zweck über eine Steuerungslogik an den Moment der Bremsbetätigung durch den Fahrer gekoppelt.

2. Testvarianten

Um eine Beurteilung der aufgestellten Hypothesen vornehmen zu können, ist neben der Prüfung von hinreichend hohen Gierstörungen ($> 10^\circ/\text{s}$) auch eine ausreichend feine Abstufung zwischen zwei benachbarten Beurteilungsvarianten der Gierstörungen bzw. des charakteristischen Fahrzeugverhaltens vorzusehen. Die Beträge der charakteristischen Gierstörungen und weiterer Bewegungskennwerte infolge eines Hinterradlenkeingriffs werden in Open-Loop-Versuchen bestimmt. Der Lenkwinkelsprung an der Hinterachse zur Variation des Fahrzeugverhaltens in Bremsmanövern wird in der Realstudie zwischen $\delta_h = 0,00^\circ - 2,00^\circ$ in Schritten von $\Delta\delta_h = 0,25^\circ$ variiert. In den beiden durchgeführten Studien mit Normalfahrern wird anschließend die Beherrschbarkeit des resultierenden Fahrzeugverhaltens im durch die Fahrer geschlossenen Regelkreis geprüft. Die Aufschaltung der HA-Lenkwinkel geschieht dabei irreversibel, d.h. es erfolgt keine direkte Rückstellung im Anschluss an eine Störung. Hierdurch soll eine eventuelle Erhöhung der Störbeurteilung durch doppelte Aufschaltung vermieden, siehe Neukum et al.³⁷⁶.

Tabelle 3.2 zeigt die resultierenden charakteristischen Open-Loop-Gierstörungen $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ infolge der variierten Hinterradlenkwinkel δ_h in allen Bremsmanövern der Realstudie und am Fahrsimulator. Am Fahrsimulator werden die entsprechenden HA-Stellwinkel so gewählt, dass annähernd ganzzahlige Gierstörungen resultieren. In allen Bremsma-

³⁷⁶ Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

növern der Realstudie wird im relevanten Bereich zwischen 5-10°/s Open-Loop-Gierstörung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ ein Abstand zwischen zwei benachbarten Störintensitäten von maximal ca. 2°/s Differenz der Giergeschwindigkeitsabweichung erzielt.

Tabelle 3.2 Übersicht der mittleren Open-Loop-Gierstörungen und HA-Stellwinkel in den Bremsversuchen der Realstudie und am Fahrsimulator

Maximale Gierstörungen (Open-Loop), %s										
Testmanöver	Instrument	HA-Stellwinkel, °								
		0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
Geradeausbremsung 80 km/h	Testfahrzeug mit HSR	0,0	2,1	4,3	5,9	7,7	9,1	10,3	11,3	13,4
Kurvenbremsung 80 km/h		1,5	3,4	4,4	6,4	8,2	9,5	10,2	10,4	11,9
Geradeausbremsung 120 km/h		0,0	2,9	5,8	7,9	9,8	11,2	12,8	13,4	16,1
Testmanöver	(Anpassung HA-Stellwinkel an Zielvariante)									
Geradeausbremsung 120 km/h	Fahrsimulator	0	2	4	6	7	8	10	12	
Geradeausbremsung 180 km/h		0	2	4	5	6	7	8	10	

Am Fahrsimulator wird im Bereich der erwarteten Akzeptanzgrenzen eine noch geringere Abstufung von 1°/s Giergeschwindigkeitsabweichung vorgesehen. Zur Erklärung: Die Fahrsimulatorstudie wird im Anschluss an die Realstudie durchgeführt, so dass die Ergebnisse der Realstudie zur Präzisierung der Erwartungsbereiche für die Akzeptanzgrenzen verwendet werden können. An diesen möglichst eng gewählten Stützpunkten kann eine direkte Bewertung der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit erfolgen, während zur Beurteilung von abweichenden Gierstörungen eine Inter- oder Extrapolation der Ergebnisse erfolgen müsste. Insbesondere die Extrapolation der Ergebnisse ist hierbei nach Neukum zu vermeiden.³⁷⁷ In den Bremsmanövern der Realstudie werden durch neun verschiedene Stellwinkel an der Hinterachse jeweils neun verschiedene Gierstörungsvarianten untersucht. Bei Aufschaltung der Hinterradlenkwinkel δ_h in ungebremster Geradeaus- oder Kurvenfahrt werden hingegen nur 4 Varianten untersucht, da lediglich eine punktuelle Vergleichsprüfung stattfinden soll. Am Fahrsimulator werden bei Geradeausbremsung aus 120 km/h und 180 km/h jeweils 8 Abstufungen der Gierstörung verwendet. Darüber hinaus wird am Fahrsimulator eine weitere Variante der Geradeausbremsung aus 120 km/h mit einer erhöhten Verstellgeschwindigkeit der verwendeten Hinterachslenkung untersucht (20°/s statt 4°/s Lenkgeschwindigkeit), um den Einfluss einer kürzeren Verzugszeit des auftretenden Gierstörungsmaximums nach Bremsbeginn zu prüfen.

3. Gestaltung der Fahrgassen

Die aufgeschalteten Gierstörungen bzw. Hinterradlenkwinkel δ_h müssen durch die Normalfahrer sicher stabilisiert werden. Ein wesentlicher Bestandteil der Bewertung des resultierenden objektiven Kurshaltevermögens ist die Vorgabe eines eindeutigen und si-

³⁷⁷ Neukum (2002): Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop

chere Sollkursverlaufs. Zu diesem Zweck sollen die Fahrstreifen der bereits vorgestellten Testmanöver durch deutlich sichtbare Pylonen-Markierungen seitlich begrenzt werden. Die Vorteile einer Pylonen-Markierung im Gegensatz zu einer farblich hervorgehobenen Fahrstreifenbegrenzung sind der höhere Aufforderungsgrad für den Fahrer, eine Kollision zu vermeiden, und das leicht wahrnehmbare Kollisionsereignis für den Fall einer Fahrgassenverletzung. Insgesamt werden vier verschiedene Pylonen-begrenzte Fahrgasstypen verwendet, siehe Bild 3.1. Die Unterschiede bestehen in der Fahrgassenbreite, der gefahrenen Geschwindigkeit und der Krümmung der Fahrgasse. In Geradeausfahrten und Geradeausbremsungen auf dem Fahrstreifentyp „Baustelle“ werden eine Fahrstreifenbreite von 2,5 m und eine Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h vorgesehen. Diese Fahrstreifenbreite entspricht der Mindestvorgabe für Behelfsfahrstreifen nach der in Deutschland gültigen Richtlinie für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen.³⁷⁸ Die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit beträgt 80 km/h. Die Mindestfahrstreifenbreite von Überlandstraßen in dünn besiedelten Gebieten beträgt hingegen 2,75 m (RAS-Q).³⁷⁹ Für den Fahrstreifentyp „enge Landstraße“ wird dennoch analog zu den vorgesehenen Geradeausbremsungen aus 80 km/h eine Fahrstreifenbreite von nur 2,5 m gewählt. Durch diese identische Auswahl soll die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu Geradeausbremsungen sichergestellt werden, da bekannte Studien eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Fahrstreifenbreite vermuten lassen, vergleiche Schmidt et al.³⁸⁰ und Switkes^{381,382} mit Schmidt³⁸³. Zudem soll durch die Wahl einer engen Fahrstreifenbreite von 2,5 m in Kurvenfahrt eine hohe Anforderung an den Fahrer zur Kurshaltung sichergestellt werden und somit vermieden werden, dass Fahrer die Kurve durch eine individuelle Linienwahl bewusst „schneiden“. Die individuelle Ausnutzung von Handlungsspielräumen durch den Fahrer ist in der Forschung bekannt.³⁸⁴ Ebenfalls wird die Forderung eines ausreichenden Anforderungsgrades für die Versuchsgestaltung genannt.³⁸⁵

Nach zwei Übersichten von Forschungsergebnissen in Bild 3.2 entspricht eine Querbesehleunigung von ca. 4 m/s^2 der maximalen Querbesehleunigung, die Normalfahrer abgesehen von Notsituationen zur Kurshaltung aufbringen. Die maximal ausgenutzten Querbesehleunigungen bis 4 m/s^2 durch Normalfahrer finden ebenfalls bei Bachmann et

³⁷⁸ Bundesministerium für Verkehr (2001): Sicherung von Arbeitsstellen (RSA-95)

³⁷⁹ FGSV (1996): Richtlinien für die Anlage von Straßen - Querschnitt (RAS-Q)

³⁸⁰ Schmidt et al. (2007): Auswirkung haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug-System

³⁸¹ Switkes (2006): Handwheel force feedback with lanekeeping assistance

³⁸² Switkes et al. (2007): Driver response to steering torque disturbances

³⁸³ Schmidt (2007): Wann spürt der Fahrer überhaupt? Der Einfluss des Fahrmanövers auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten als haptische Signale im Fahrzeug

³⁸⁴ Bruder et al (2009): Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens

³⁸⁵ Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße

al. Bestätigung.³⁸⁶ Der in dieser Studie verwendete Radius des Kurvenstücks „enge Landstraße“ wird daher entsprechend einer stationären Querb beschleunigung von 4 m/s^2 bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h zu $R = 123 \text{ m}$ abgeleitet. Die Einfahrt in das Kurvenstück wird in Form einer *Klotoide* gestaltet, um einen „fließenden“ und somit beherrschbaren Übergang in die stationäre Kreisfahrt zu gewährleisten. Heutige Straßenkurvenverläufe sind ebenfalls als Klotoiden konstruiert, um notwendige Lenkwinkelsprünge während des Einlenkvorgangs in Kurvenfahrten zu vermeiden.^{387,388}

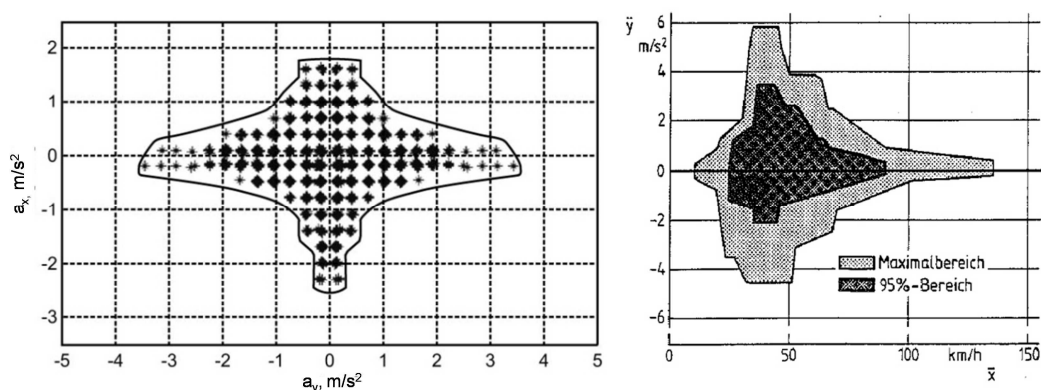


Bild 3.2 g-g-Diagramm des Fahrertyps „normal“ (links)³⁸⁹, Bereich der Fahrgeschwindigkeit und Querb beschleunigung bei kurviger Landstraßenfahrt (rechts)³⁹⁰

Die Bewertung der Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Geradeausbremsung bei erhöhten Fahrgeschwindigkeiten erfolgt auf den Fahrstreifentypen „Autobahn“ (Realstudie, 120 km/h) und „3-streifige Autobahn“ (Fahrsimulatorstudie, $120\text{--}180 \text{ km/h}$). Die Fahrstreifenbreite der gängigen Entwurfsklassen EK1/2 beträgt nach der Richtlinie für die Anlage von Autobahnen (RAA)³⁹¹ mindestens $3,5 \text{ m}$ und wird für diese Studie folglich übernommen. Der Fahrstreifentyp „Autobahn“ und die weiteren Fahrstreifentypen „Baustelle“ und „enge Landstraße“ werden in der Realstudie auf einer großen Asphaltfläche ohne direkte umliegende Straßenbebauung dargestellt. In der Simulationsumgebung des Fahrsimulators kann hingegen eine realistische, 3-streifige Autobahnstrecke für die Durchführung der Geradeausbremsungen gewählt werden. Um einen mit der Realstudie vergleichbaren Raumeindruck zu gewährleisten, wird der mittlere Fahrstreifen für die zu verwendende Fahrspur ausgewählt und ebenfalls mit einer deutlich sichtbaren Pylonenbegrenzung versehen.

³⁸⁶ Bachmann et al. (1995): Der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn

³⁸⁷ Mitschke, Wallentowitz (2004): Dynamik der Kraftfahrzeuge

³⁸⁸ FGSV (1996): Richtlinien für die Anlage von Straßen - Querschnitt (RAS-Q)

³⁸⁹ Wegscheider, Prokop (2005): Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrer-Assistenzsystemen, S. 17ff

³⁹⁰ Hackenberg, Heißing (1982): Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr

³⁹¹ FGSV (2008): Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA)

4. Stichprobenumfang und Probandenauswahl

Auf den dargestellten Fahrstreifentypen sollen die benötigten Fahrmanöver und Testvarianten nach Bild 3.1 bzw. Tabelle 3.2 durchgeführt werden. Die Bewertbarkeit der Hypothesen und somit die Aussagekraft der Ergebnisse sind dabei neben der Variantenanzahl vor allem von der Auswahl eines geeigneten Probandenkollektivs und der Definition einer geeigneten Stichprobengröße abhängig.

In den in dieser Arbeit durchgeführten Studien zur Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern werden insgesamt 51 verschiedene Kombinationen aus einem Fahrmanöver und einem HA-Lenkwinkel geprüft. Die Auswahl von Normalfahrern anstelle von geübten Testfahrern erfolgt aufgrund des formulierten Ziels dieser Arbeit, die kundenrepräsentative Beherrschbarkeit von Gierstörungen zu bewerten. Die geforderte Anzahl von 30 verschiedenen Fahrern pro Testvariante ergibt sich zum einen aus der Stichprobenanzahl vergleichbarer Studien³⁹², vor allem aber aus statistischen Überlegungen: Zum Nachweis der Beherrschbarkeit einer Gierstörungsvariante wird in dieser Arbeit das objektive Kurshaltevermögen betrachtet, siehe Kapitel 3.3.3. Mit der im Fahrversuch ermittelten Anzahl von erfolgreichen Fahrten pro Variante kann unter der Annahme einer Binomialverteilung³⁹³ der Ergebnisse eine bestimmte Wahrscheinlichkeit des Eintritts einer sicheren Kursführung nachgewiesen werden. Soll beispielsweise eine Wahrscheinlichkeit von $p = 0,85$ für die sichere Beherrschbarkeit einer Situation auf dem üblichen 95 %-Signifikanzniveau nachgewiesen werden, so müssten bei nur 18 Testpersonen alle Versuchspersonen das Manöver bestehen (lediglich 94,6 % Signifikanzerzielung bei 17/18 erfolgreichen Manövern). Ab 19 Testpersonen kann die Hypothese $p = 0,85$ auch bei einem einzelnen negativen Fahrergebnis noch auf dem 95 %-Signifikanzniveau nachgewiesen werden (95,4 %) und ab $n = 30$ bei zwei negativen Fahrergebnissen (95,2 %). Dieser Nachweis ist im Hinblick auf die Bewertung der funktionalen Sicherheit nach ISO 26262-3³⁹⁴ entscheidend, die in Kapitel 6 diskutiert wird. Zur Steigerung der Robustheit der Studie gegen Einzelereignisse erfolgt die Durchführung der Studie also mit mindestens 30 unterschiedlichen Normalfahrern pro Testvariante. Als Kriterium für die Repräsentanz des ausgewählten Normalfahrerkollektivs dient die statistische Verteilung von Alter und Geschlecht der Führerscheinbesitzer in Deutschland nach der Statistik des Kraftfahrbundesamtes (KBA) aus Bild 3.3. Das KBA unterscheidet in fünf Altersgruppen (< 18, 18-24, 25-44, 45-64 und > 65 Jahre). Mit Ausnahme der Altersgruppe < 18 Jahre wird für die Studie gefordert, jede Altersgruppe mit einem Anteil von mindestens 10 % oder höher zu vertreten, siehe Bild 3.3. Zudem

³⁹² Wesp et al. (2009): Einfluss der Systemauslegung hinterachsgelenkter Fahrzeuge

³⁹³ Lozán, Kausch (2007): Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler, 4. Auflage

³⁹⁴ ISO 26262-3 (2011): Functional safety – Part 3: Concept phase

soll ein Anteil weiblicher Versuchspersonen im Bereich der KBA-Statistik von 41 % mit einer maximal tolerierten Abweichung von ± 5 % erzielt werden.

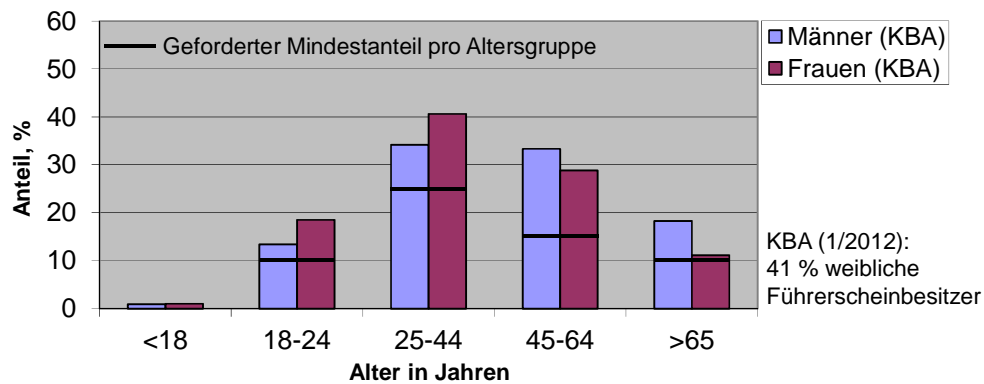


Bild 3.3 Altersverteilung der Führerscheinbesitze in Deutschland nach KBA (01/2012) und geforderter Mindestanteil an Testpersonen für jede Altersgruppe

Aufgrund der hohen Anzahl an benötigten Versuchsvarianten werden zur Reduktion der Versuchsdauer eines einzelnen Probanden insgesamt jeweils ca. 100 Probanden benötigt. Der Nachweis eines eventuell vorhandenen Gewöhnungseffekts der Subjektivbeurteilung oder des objektiven Kurshaltevermögens über der Versuchsdauer wird durch die Wiederholung der ersten Variante am Ende der Versuche mit $n > 50$ der 100 Fahrer in der Realstudie und $n > 100$ Fahrer in der Studie am Fahrsimulator erzielt. Um potentielle Gewöhnungseffekte so gering wie möglich zu halten, werden die Gierstörungen in stochastisch wechselnder Richtung aufgeschaltet. Eine wechselnde Aufschaltung in beide Richtungen wird auch von Mitschke/Niemann empfohlen.³⁹⁵ Die Abfolge der Fahrmanöver ist für jeden Fahrer identisch, während die Auswahl der jeweiligen Gierstörungsvariante nach einer vorab definierten stochastischen Variation erfolgt: Eine vollständige Permutation ist aufgrund der Anzahl der Versuchsvarianten nicht möglich. Daher basiert die Versuchsreihenfolge für jede Testperson auf einem angewandten Zufallszahlengenerator unter Berücksichtigung fester Regeln:

- Die Manöverabfolge ist festgelegt
- Eine identische Gierstörungsvariante (= Testmanöver + HA-Lenkwinkel) darf einer Testperson nicht doppelt zugeordnet werden (Ausnahme: Beabsichtigte Wiederholfahrt zu Ende der Versuchsreihe)
- Es erfolgt eine Gleichverteilung von drei vorab klassifizierten Störintensitäten (niedrig, mittel und hoch) auf die Testpersonen
- Die benötigte Anzahl der Wiederholfahrten ($n_i \geq 30$) für jede Gierstörungsvariante mit unterschiedlichen Testpersonen wird erzielt

³⁹⁵ Mitschke, Niemann (1974): Regelkreis Fahrer-Fahrzeug bei Störung durch schiefziehende Bremsen

Auf diese Weise erfolgt eine zufällige Zuordnung der durchgeführten Gierstörungsvarianten auf die Testpersonen ohne Häufung von vergleichbaren Störintensitäten bei einer Testperson und ohne unbeabsichtigte Wiederholfahrten.

3.3.2 Testmanöver zur Bewertung von überhöhten Schwimmwinkeln

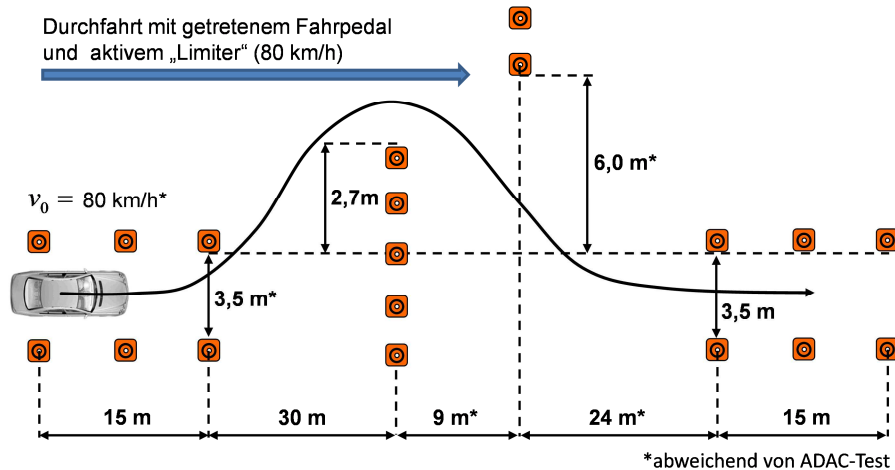


Bild 3.4 Abgewandelter ADAC-Ausweichtest zur Prüfung der Beherrschbarkeit erhöhter Schwimmwinkel in einem Ausweichtest

Zur Bewertung von überhöhten Schwimmwinkeln $\beta_{SP/HA}$ in Ausweichsituationen wird ein Ausweichtest verwendet, der in seinen Abmaßen dem ADAC-Ausweichtest ähnelt. Im Gegensatz zu VDA oder ISO-Spurwechseltest erhält der Fahrer in diesem Ausweichtest durch die Gestaltung eines Hindernisses in Ausgangsfahrtrichtung eine eindeutige Aufforderung zum aktiven Ausweichen, was die Eindeutigkeit der Wahl eines sicheren Sollkurses durch den Fahrer unterstützt. Eine Weiterfahrt ohne Ausweichen hat unmittelbar eine Kollision mit den Hindernis-Pylonen zur Folge. Die Einfahrtsgeschwindigkeit beträgt 80 km/h, um einen vergleichbaren Geschwindigkeitsbereich in Bezug auf die untersuchten Kurvenbremsungen abzubilden. Die Abmaße des verwendeten Ausweichtests werden durch Anpassung in Vorversuchen so gewählt, dass ohne ein auffälliges Fahrverhalten (keine hohen Schwimmwinkel und Querbeschleunigungen) für die meisten Normalfahrer eine sichere Durchfahrt ohne Pylonenkontakte möglich ist.

Der Ausweichtest ist nur im geschlossenen Regelkreis durchführbar. Daher werden im Gegensatz zu den variierten Gierstörungen in Bremsmanövern keine im Open-Loop ermittelten Kennwerte der maximalen Schwimmwinkel $\beta_{\max, SP/HA}$ ermittelt. Die resultierenden Schwimmwinkel sind in einem Ausweichtest bei einem identischen Fahrverhalten vor allem von den Lenkeingaben des Fahrers abhängig. Durch ein zusätzliches, querbeschleunigungs-proportionales Mitlenken der Hinterachse mit

$$\delta_h = k_{prop} \cdot a_y \quad (3.1)$$

kann die Eigenlenkcharakteristik des Fahrzeugs jedoch in Richtung eines übersteuern- den Fahrverhaltens und somit in Richtung größerer Schwimmwinkel bei gleicher Lenk- eingabe verschoben werden. Der Mitlenkfaktor wird im Ausweichtest zwischen $k_{prop} = 0,00 \dots 0,20^\circ \text{s}^2/\text{m}$ mit einer Schrittweite von $\Delta k_{prop} = 0,05^\circ \text{s}^2/\text{m}$ variiert. Die ei- gentliche Bewertungsgröße – der maximal auftretende Schwimmwinkel im Schwer- punkt oder an der Hinterachse $\beta_{SP/HA}$ – kann nicht direkt variiert werden, sondern muss im Anschluss an die Probandenstudie durch die Auswertung der aufgezeichneten Mess- daten bestimmt werden. Jeder Proband absolviert zwei zeitlich voneinander getrennte Ausweichtests mit nur einer Übungsfahrt, um mögliche Trainings- und Gewöhnungsef- fekte so gering wie möglich zu halten. Hieraus ergeben sich theoretische 200 Ausweich- situationen mit 100 verschiedenen Normalfahrern.

3.3.3 Subjektive und objektive Beherrschbarkeit

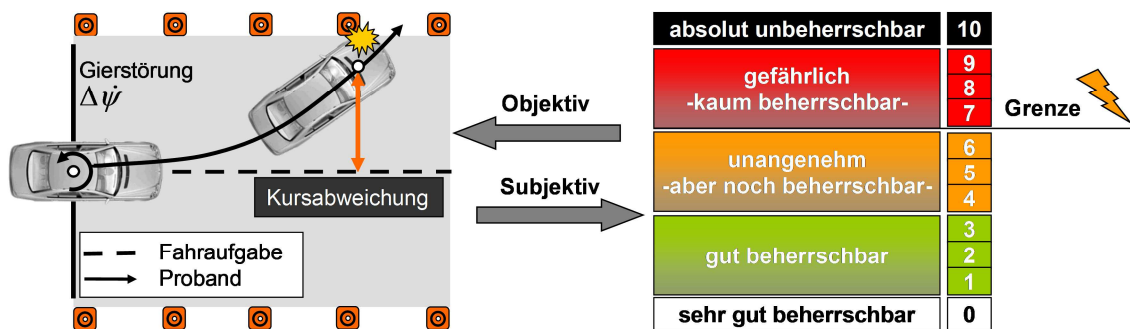


Bild 3.5 Bewertungskriterien der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit

Bild 3.5 zeigt die verwendeten Kriterien zur Bewertung der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit durch Normalfahrer in den Brems- und Ausweichtests. Die Bewertung der subjektiven Beherrschbarkeit B_S erfolgt anhand einer an die bewährte Störbeurteilungsskala³⁹⁶ von Neukum/Krüger angelehnte Beherrschbarkeits-Skala nach Bild 3.5 (rechts). Die Beherrschbarkeitsskala ist ebenfalls 11-stufig und in die 5 Hauptkategorien

- sehr gut beherrschbar ($B_S = 0$),
- gut beherrschbar ($B_S = 1-3$),
- unangenehm, aber noch beherrschbar ($B_S = 4-6$),
- gefährlich, kaum beherrschbar ($B_S = 7-9$) und
- absolut unbeherrschbar ($B_S = 10$)

³⁹⁶ Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 303

unterteilt. Die definierte Beherrschbarkeitsskala erlaubt somit ebenfalls eine klare Abtrennung zwischen dem Bereich eines lediglich „unangenehmen“ Fahrverhaltens und einer durch die Testperson empfundenen Gefährdung ($B_S \geq 7$). Die Kategorien wurden im Vergleich zur Störbeurteilungsskala von der Begrifflichkeit der „Störung“ des Fahrverhaltens losgelöst, da in dieser Arbeit das variierte Grundfahrzeugverhalten in Brems- und Ausweichtests untersucht werden soll. Speziell in Ausweichtests ist durch ein kontinuierliches Mitlenken der Hinterachse keine explizite Störung des Fahrverhaltens wahrnehmbar. Die Beherrschbarkeit einer Situation kann hingegen auch in einem Ausweichtest beurteilt werden und steht zudem in einem direkten Zusammenhang mit der Erfüllung der Fahraufgabe. Die Abfrage der Beherrschbarkeit der erlebten Fahrsituation erfolgt jeweils im direkten Anschluss an eine Versuchsvariante.

Die Erfüllung der Fahraufgabe wird nach Kapitel 2.3.1 in der Literatur als die Hauptaufgabe des Fahrers verstanden und daher in dieser Arbeit als das objektive Kriterium für die Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens verwendet. Die Fahraufgabe gilt als nicht erfüllt, wenn der Fahrer von dem definierten Fahrstreifen abkommt und mit einer Pylone kollidiert. Dieses Entscheidungskriterium findet sowohl in den Bremsmanövern als auch in den Ausweichtests Anwendung. Zusätzlich soll in den Bremsmanövern auch der tatsächliche Kursverlauf infolge einer Gierstörung erfasst werden. Auf Basis des Kursverlaufs können die maximale Kursabweichung und der minimal auftretende Fahrstreifenabstand infolge einer Gierstörung als weitere objektive Kriterien der Beherrschbarkeit bestimmt werden. In Ausweichtests erscheint die Anwendung dieser zusätzlichen Kriterien hingegen nicht sinnvoll, da der Sollkurs im ADAC-Test vom Fahrer individuell gewählt werden kann. In den Bremsmanövern werden die Probanden hingegen dazu aufgefordert, den Fahrstreifen möglichst mittig zu befahren und keinesfalls zu verlassen. Die seitliche Kursabweichung wird in der späteren Auswertung der Ergebnisse auf die Außenkanten der Reifen von Vorder- und Hinterachse bezogen, da die Position der Reifen maßgebend für ein potentiell Verlassen der Fahrbahn ist. Eine Erfassung der Kursabweichung ist durch die Verwendung eines Differential-GPS-Systems der Firma iMAR (iTraceRT-F200-E und iREF-L1L2 RTK GPS Basisstation) mit einer Genauigkeit von ca. ± 2 cm (Herstellerangabe) vorgesehen, siehe Kapitel 4.3.

3.4 Variation von Gierstörungen und Schwimmwinkeln mittels HSR

In den vorangegangenen Abschnitten wurde bereits auf die eingesetzte Methode der Variation von Gierstörungen in Bremsmanövern und der Gierstabilität in Ausweichtests durch eine Hinterradverstellung verwiesen. Dieser Abschnitt erläutert die Auswahl der Hinterradverstellung als Versuchsinstrument und weist die Eignung der Hinterradverstellung zur Variation von Gierstörungen in Bremsmanövern nach.

3.4.1 Wirkprinzip

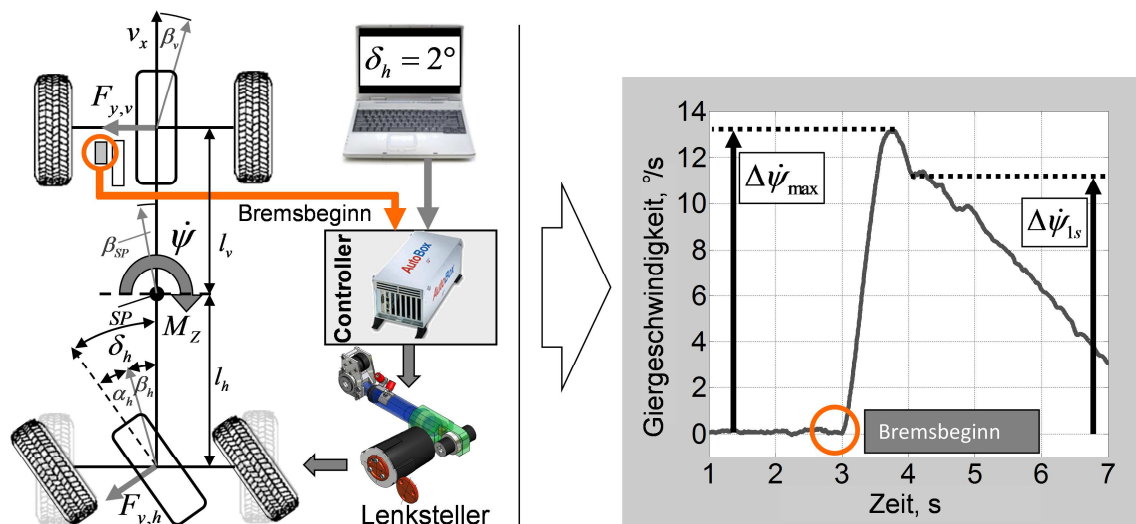


Bild 3.6 Wirkprinzip der Hinterradverstellung zur Variation von bremsgetriggerten Gierstörungen

Zur Durchführung der Studie muss das Fahrzeugverhalten im Moment der Bremsbetätigung durch den Fahrer variiert werden können. Der Eingriff soll zudem möglichst nah an ein nicht durch Lenksystemfalsch Eingriffe gestörtes Fahrverhalten verschiedener Fahrzeuge z.B. in Kurvenbremsung oder in Ausweichsituationen heranreichen, um Ergebnisse zu erzielen, die auf das Fahrverhalten übertragbar sind. Eingriffe in die Lenkung der Vorderachse kommen daher aufgrund der bekannten reflexbedingten Reaktion der Fahrer auf sprunghafte Änderungen des Lenkradmoments^{397,398,399} nicht in Frage, sofern nicht gleichzeitig eine Kompensation der Lenkradmomentenänderung durch Steer-by-Wire vorgenommen wird. Ebenfalls ist eine gezielte Beeinflussung des Fahrzeugverhaltens durch Störungen von außen, beispielsweise durch Unebenheitsanregungen, Reibwertsprünge oder Seitenwind, nicht im exakten Moment der Bremsbetätigung darstellbar. Aus diesem Grund wird zur reproduzierbaren und zeitlich steuerbaren Variation von Gierstörungen eine Hinterradlenkung verwendet, die einen vordefinierten HA-Lenkswinkel δ_h genau im Moment der Bremsbetätigung auslöst, siehe Bild 3.6 (links). Die Hinterradverstellung wird im verwendeten Versuchsfahrzeug – ein Fahrzeug der Mercedes-Benz C-Klasse des Typs S204 – durch den Tausch der beiden Querlenker der Hinterachse mit einer Linearaktorik realisiert. Diese Linearaktorik ist an eine Autobox gekoppelt, die wiederum alle relevanten Signale zur Hinterradverstellung, wie z.B. die Bremspedalbetätigung oder die aktuelle Querbewegung a_y , empfängt. Durch diesen

³⁹⁷ Krüger (2000): Wenn intelligente Systeme intelligente Fahrer unterstützen, S. 1331ff

³⁹⁸ Neukum et al. (2009): Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems

³⁹⁹ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

Aufbau ist es möglich, die entsprechende Logik zur Aktivierung der HA-Verstellung im Moment der Bremsung durch den Fahrer darzustellen und ebenfalls ein querbeschleunigungsproportionales Mitlenken in Ausweichtests zu realisieren.

Aus der Schräglaufsteifigkeit der Hinterachse $c_{\alpha,h}$ resultiert im Einspurmodell unter der Annahme einer Sprungfunktion des Hinterradlenkwinkels in Bremsmanövern und eines zeitlich nicht verzögerten Aufbaus der Seitenkräfte an den gelenkten Rädern zum Zeitpunkt der Verstellung $t = 3 \text{ s}$ nach Bild 3.6 (rechts) die Seitenkraftdifferenz an der Hinterachse und das Giermoment um die Hochachse des Fahrzeugs

$$M_z(t = 3 \text{ s}) = \Delta F_{y,h} \cdot \cos \delta_h \cdot l_h. \quad (3.2)$$

Unter Berücksichtigung der Gierträgheit Θ_z des Fahrzeugs resultiert aus der Seitenkraftdifferenz an der Hinterachse zu Stellbeginn wiederum die Gierbeschleunigung

$$\ddot{\psi}(t = 3 \text{ s}) = \frac{\delta_h \cdot c_{\alpha,h} \cdot \cos \delta_h \cdot l_h}{\Theta_z}. \quad (3.3)$$

Der Anstieg der Giergeschwindigkeit für $t > 3 \text{ s}$ führt zu einer Veränderung der Schräglaufwinkelszustände α_i an Vorder- und Hinterachse. Die hieraus resultierenden Seitenkraftdifferenzen an beiden Achsen wirken dem erzeugten Giermoment entgegen. Zum Zeitpunkt des vollständigen Ausgleichs des Giermoments ($t \approx 3,7 \text{ s}$) erreicht die Giergeschwindigkeitsabweichung ihr Maximum (Bild 3.6, rechts). Aufgrund der gleichzeitigen Geschwindigkeitsreduktion des Fahrzeugs während einer Bremsung sinkt die Giergeschwindigkeit im weiteren Verlauf der dargestellten Messung des Versuchsfahrzeugs ab. Dieses Verhalten entspricht dem Wirkprinzip nach einem Übersteuern infolge Kurvenbremsung oder eines Lastwechsels. Auch infolge einer Kurvenbremsung verliert die Hinterachse nach Kapitel 8.3.2 an Schräglaufsteifigkeit, was zu einer zusätzlichen Eindrehbewegung des Fahrzeugs in die Kurve führen kann. Die Hinterradverstellung erscheint daher als eine geeignete Methode zur Variation des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern.

Diese Aussage kann ebenfalls für die Variation des Grundfahrzeugverhaltens durch eine Hinterradlenkung hinsichtlich der Stabilität in dynamischen Ausweichsituationen getroffen werden: Nach Kapitel 2.1.2 ist die Summen-Schräglaufsteifigkeit $c_{\alpha,h}$ der Hinterachse in Relation zur Summen-Schräglaufsteifigkeit der Vorderachse $c_{\alpha,v}$ für die Gierstabilität des Fahrzeugs maßgebend. Durch ein querbeschleunigungsproportionales, gegensinniges Mitlenken der Hinterachse mit $\delta_h = k_{prop} \cdot a_y$ weichen die Hinterräder dem ansteigenden Schwimmwinkel an der Hinterachse β_{HA} während eines Anlenkvorgangs aus und der effektiv wirksame Schräglaufwinkel an den Hinterrädern $\alpha_{h,i}$ wird reduziert.

Hieraus resultiert wiederum eine Reduktion der Summen-Schräglaufsteifigkeit $c_{\alpha,h}$ in Bezug auf den Schwimmwinkel der Hinterachse β_{HA} . Das Fahrverhalten wird also in Richtung eines instabileren Gierverhaltens verändert, d.h. bei identischen Lenkeingaben resultieren höhere Schwimmwinkel $\beta_{SP/HA}$.

3.4.2 Validierung in Vorversuchen

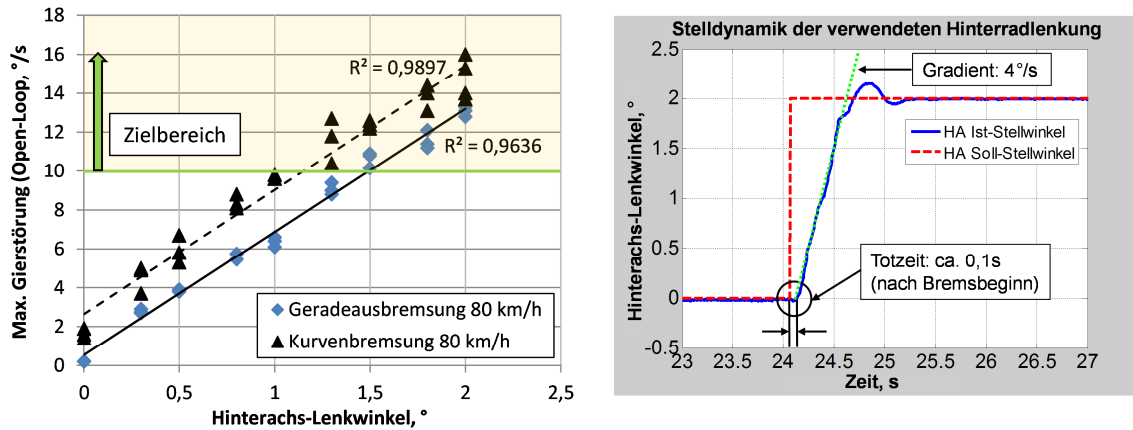


Bild 3.7 Eignungsnachweis der verwendeten HSR zur Variation von Gierstörungen in Geradeaus- und Kurvenbremsung und Stelldynamik der HSR

In Vorversuchen wird geprüft, ob eine reproduzierbare Abstufung der Gierstörungen durch eine Hinterradverstellung möglich ist. Bild 3.7 (links) zeigt die Abhängigkeit der auftretenden Gierstörungen von der Aufschaltung verschiedener Lenkwinkel δ_h in Geradeausbremsung und in Kurvenbremsung aus 80 km/h. Nach einer Totzeit von ca. 0,1 s ab Bremsbeginn zeigt die Verstellaktorik nach Bild 3.7 (rechts) ein annähernd lineares Anstiegsverhalten mit einer Verstellgeschwindigkeit von ca. $\dot{\delta}_h = 4^\circ/\text{s}$. Die Verstellung wird aufgrund ihrer linearen Charakteristik und niedrigen Überschwingweiten durch eine einfache Schaltregelung realisiert. Die Verstellung erfolgt über die Bestromung des Linearaktors mit 24V Gleichspannung in die gewünschte Stellrichtung, sobald eine definierte Sollwertdifferenz

$$\Delta\delta_h = \delta_{h,soll} - \delta_{h,ist} \quad (3.4)$$

überschritten wird. Die erzielten Open-Loop-Gierstörungen mit fixiertem Lenkrad aus Bild 3.7 (links) weisen die Möglichkeit zur reproduzierbaren Variation von Gierstörungsmaxima $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ bis in den Zielbereich $> 10^\circ/\text{s}$ durch eine an das Bremspedal gekoppelte Hinterradverstellung nach. In den Wiederholversuchen wird jedoch eine Streubreite der Ergebnisse bei Messungen mit identischem HA-Stellwinkel beobachtet. Die Ursache wird in der manuellen Fixierung des Lenkrads, fahrbahninduzierten Störungen und einer abweichenden Bremsintensität der Wiederholfahrten vermutet.

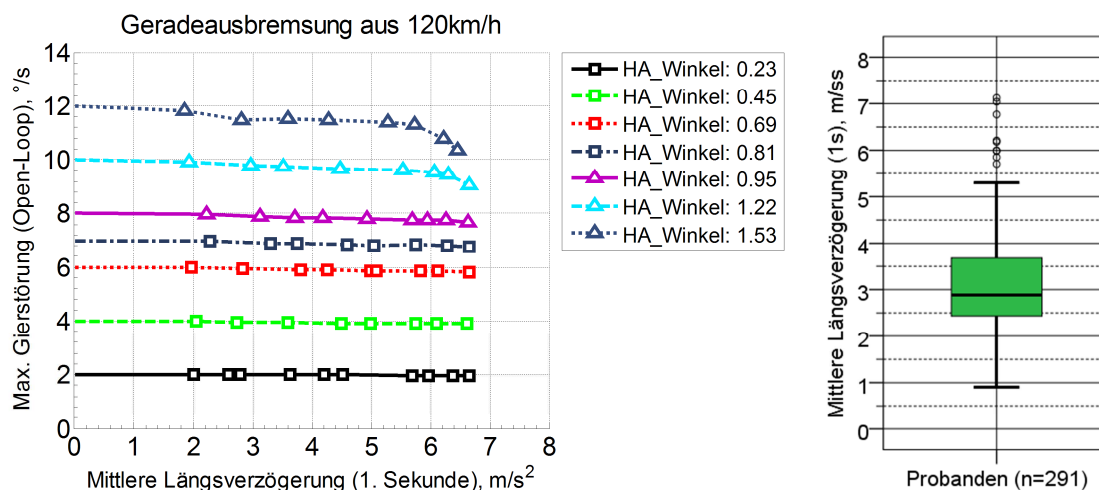


Bild 3.8 Abhängigkeit der maximalen Gierstörungen von der Bremsintensität in Geradeausbremsung aus 120 km/h bei konstantem Lenkradwinkel und jeweils konstantem HA-Lenkwinkel (links, Simulation) sowie tatsächliche Verteilung der mittleren Längsverzögerung der 291 Probanden in Geradeausbremsung aus 120 km/h (rechts, Realstudie)

Zur Prüfung des Einflusses einer abweichenden Bremsintensität auf den Betrag der Gierstörung wird das am Fahrsimulator der Daimler AG verwendete und in Kapitel 3.5 validierte FADYS-Simulationsmodell herangezogen. In dieser Prüfung nach Bild 3.8 (links) wird die mittlere Längsverzögerung innerhalb der ersten Sekunde nach Bremsbeginn bei ideal konstanter Lenkradstellung (0°) variiert und der Verlauf der Gierstörungsmaxima bei Aufschaltung eines jeweils konstanten HA-Stellwinkels in Geradeausbremsung aus 120 km/h ermittelt. Das Ergebnis aus Bild 3.8 (links) zeigt bis hin zu einer Ausgangsgierstörung von ca. $7^\circ/\text{s}$ bei ungebremster Aufschaltung keine relevante Reduktion der Gierstörung in Abhängigkeit einer gesteigerten Bremsintensität ($< 0,2^\circ/\text{s}$). Erst ab Ausgangsgierstörungen von ca. $8^\circ/\text{s}$ und einer mittleren Bremsverzögerung innerhalb der ersten Sekunde nach Bremsbeginn $> 5 \text{ m/s}^2$ wird eine Reduktion um bis zu $0,4^\circ/\text{s}$ Gierstörungsdifferenz ersichtlich. Bei weiterer Erhöhung der Ausgangsgierstörung ($10^\circ/\text{s}$ und $12^\circ/\text{s}$) tritt diese Reduktion bereits bei niedrigeren Bremsintensitäten auf und beträgt oberhalb von 5 m/s^2 mittlerer Längsverzögerung bis zu $1,8^\circ/\text{s}$ bzw. 15 % Reduktion. Eine Begründung der deutlicheren Reduktion der Gierstörungen bei hohen HA-Stellwinkeln und hohen Längsverzögerungen kann in der ansteigenden Verzugszeit bis zum Erreichen des Gierstörungsmaximums gefunden werden, siehe spätere Gegenüberstellung in Bild 3.11. Während eine Gierstörung von $2^\circ/\text{s}$ bereits 0,4 s nach Bremsbeginn erzielt wird, verzögert sich die Anstiegszeit bei einer Gierstörung von $12^\circ/\text{s}$ um weitere 0,2 s auf insgesamt 0,6 s. Zu diesem Zeitpunkt ist die Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs bei hohen Längsverzögerungen bereits deutlich reduziert und die Radlastverschiebung von Hinterachse in Richtung Vorderachse infolge der hohen Längsverzögerung deutlicher ausgeprägt. Bis hin zu einer Verzugszeit von ca. 0,5 s kann hingegen keine für die Versuchsdurchführung relevante Abweichung festge-

stellt werden ($< 0,2^\circ/\text{s}$ bei Vollbremsung). Als Konsequenz der beobachteten Verminderung der Gierstörungen bei hohen HA-Stellwinkeln in Kombination mit hohen Bremsintensitäten werden die Probanden in der durchgeführten Studie dazu aufgefordert, lediglich mittelstarke Bremsungen durchzuführen. Zusätzlich werden die Open-Loop-Störungen zur Auswertung der Studie im Bereich einer mittleren Längsverzögerung ermittelt. Bild 3.8 (rechts) zeigt die tatsächlich erzielte Verteilung der mittleren Längsverzögerung von 291 Testfahrten mit ca. 100 Probanden in der ersten Sekunde nach Bremsbeginn bei Geradeausbremsung aus 120 km/h. Der Boxplot zeigt einen Median von ca. $2,85 \text{ m/s}^2$ Längsverzögerung an, d.h. ca. 50 % aller Probanden bremsen mit einer geringeren Intensität als 3 m/s^2 . Des Weiteren bremsen 95 % aller Probanden im Bereich von ca. $1\text{--}5,3 \text{ m/s}^2$ mittlerer Längsverzögerung. Nur einzelne Fahrer führen entgegen der Anweisung eine Vollbremsung durch. In diesem überwiegend vorliegenden Bereich der mittleren Längsverzögerung kann bis hin zu Gierstörungen von $12^\circ/\text{s}$ nach Bild 3.8 (links) noch von geringen Abweichungen infolge der Bremsintensität ausgegangen werden.

Aufgrund der bereits geschilderten Abhängigkeit der resultierenden Schwimmwinkel $\beta_{SP/HA}$ von den Closed-Loop-Lenkeingaben des Fahrers in Ausweichsituationen kann im Vorfeld der Studie kein umfassender objektiver Beleg der Eignung der Hinterradverstellung zur Abdeckung des gewünschten Zielbereichs der Schwimmwinkel erfolgen. In Vorversuchen wird jedoch in Stichproben mit einzelnen Normalfahrern nachgewiesen, dass der vorhandene Stellbereich der Hinterradlenkung von maximal $\delta_{h,\max} = 2^\circ$ ausreicht, um hinreichend hohe Schwimmwinkel $\beta_{HA} > 5^\circ$ an der Hinterachse zu provozieren. Um ungewünschte Stabilisierungseingriffe durch das Regelsystem ESP zu vermeiden, werden in Zusammenarbeit mit dem entsprechenden Zulieferer die sogenannten „Regelschwellen“ des verbauten ESP angepasst. Durch diese veränderten Regelschwellen greift das ESP erst bei größeren Abweichungen der Gierrate oder des Schwimmwinkels von den intern berechneten Sollwerten ein. Eine vollständige Deaktivierung des ESP wird nicht gewählt, um die Anzahl der Schleudervorfälle zu minimieren. Die erhöhten Regelschwellen ermöglichen sowohl die Erzielung der gewünschten Schwimmwinkelbereiche als auch eine ungestörte Aufschaltung von Hinterradlenkeingriffen zur Variation von Gierstörungen in Geradeaus- und Kurvenbremsungen.

3.5 Variation von Gierstörungen bei hohen Fahrgeschwindigkeiten

Die Studie zur Bewertung der Beherrschbarkeit von Gierstörungen in Bremsmanövern ist in zwei bereits genannte Versuchsbestandteile aufgeteilt:

- Realstudie bis 120 km/h

- Fahrsimulatorstudie bis 180 km/h

Somit können auch Gierstörungen bei hohen Fahrgeschwindigkeiten ohne eine Gefährdung der Probanden untersucht werden. Eine Untersuchung von Gierstörungen in der Fahrsimulation kann jedoch nur dann zielführend eingesetzt werden, wenn die Simulationsumgebung alle realen Fahreindrücke hinreichend genau abbildet. Da der Fahrer nach seine Informationen zur Kursführung zu 90 % aus optischen Informationen bezieht⁴⁰⁰ und auch das Lenkmoment als eine zentrale Feedbackgröße für den Fahrer gilt, die maßgebend seine Lenkreaktionen beeinflusst^{401,402,403}, gehört neben einer exakten Bewegungsdarstellung auch eine korrekte Rückmeldung des Lenkmoments und ein realer Umgebungseindruck zu den notwendigen Anforderung an eine geeignete Simulationsumgebung. In der durchgeführten Studie wird der Ende 2010 neu eröffnete Daimler-Fahrsimulator in Sindelfingen verwendet.

3.5.1 Fahrsimulator der Daimler AG

Der Fahrsimulator der Daimler AG nach Bild 3.9 (oben) entspricht in Anlehnung an die Einordnung von Bruder et al.⁴⁰⁴ einer Simulationsumgebung mit dynamischer Bewegungssimulation, 360° Rundumprojektion, einer vollständigen Cockpitgestaltung (Gesamtfahrzeug) und einem realistischen Feedback an allen Bedienelementen wie z.B. Lenkrad und Pedalerie. Zur Darstellung einer realitätsgetreuen Bewegungssimulation wird das „Testfahrzeug“ vollständig in dem auf sechs beweglichen Stützen gelagerten Kohlefaserdom (Hexapod) platziert, siehe Hahlbrock et al.⁴⁰⁵. Die Darstellung der Querbewegungen des Fahrzeugs erfolgt durch ein seitliches Verfahren des Hexapods auf einer 12 m langen Magnetschiene. Dabei werden nach Hahlbrock et al. Verfahrensgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/s erzielt und auftretende Querbeschleunigungen können innerhalb des Fahrwegs bis in den Grenzbereich realitätsgetreu dargestellt werden. Die Gier-, Wank-, und Nickbewegungen des Fahrzeugs werden durch eine räumliche Drehung des Doms infolge einer entsprechenden Längenänderung der sechs Stützpfeiler ermöglicht. Lediglich die Längsverzögerung kann aufgrund eines fehlenden Längsverfahrwegs nur eingeschränkt nachgestellt werden. Sie wird durch eine zusätzliche Nickbewegung nachgeahmt. Die Umgebung wird durch eine 360°-Leinwand mit acht Hochleistungsprojektoren abgebildet und perspektivisch auf den Fahrer ausgerichtet. Im Motorraum des Fahrzeugs befindet sich eine Leistungselektronik und entsprechende Aktuatoren zur Darstellung des angeforderten Lenkmoments.

⁴⁰⁰ Donges (2009): Fahrerverhaltensmodelle

⁴⁰¹ Neukum et al. (2010): Wirkung diskreter Zusatzlenkmomente: Subjektive Bewertung

⁴⁰² Krüger (2000): Wenn intelligente Systeme intelligente Fahrer unterstützen, S. 1331ff

⁴⁰³ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

⁴⁰⁴ Bruder et al. (2007): Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung

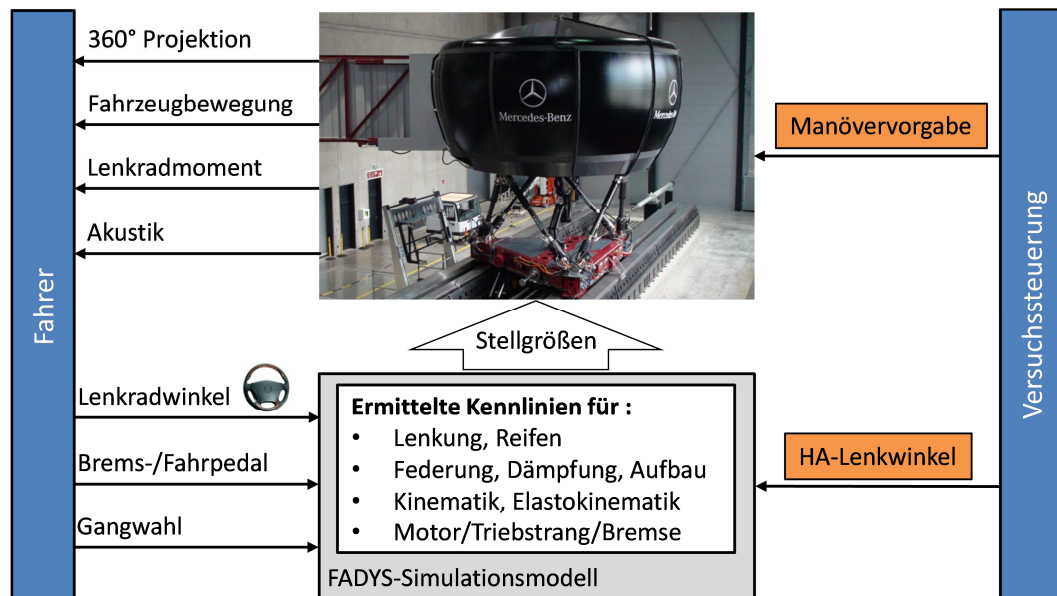


Bild 3.9 Versuchsaufbau zur Darstellung von Gierstörungen am Fahrsimulator der Daimler AG

Bild 3.9 zeigt die Versuchsstruktur zur Darstellung und Bewertung von Gierstörungen am Fahrsimulator. Die Stellgrößen des Daimler AG-Fahrsimulators wie Querbeschleunigung a_y , Gierrate $\dot{\psi}$ oder das Lenkradmoment M_H werden durch das interne Fahrdynamiksimulationsprogramm FADYS der Daimler AG berechnet. FADYS ist eine modular aufgebaute, echtzeitfähige Simulationssoftware und besteht nach Dragon⁴⁰⁶ und Baumann⁴⁰⁷ aus verschiedenen erweiterbaren Programmbausteinen, die anhand von Kennlinien beschrieben werden. Die Kennlinien für Lenkung, Reifen, Federung, Dämpfung, Motor, Triebstrang, Bremse und weitere Fahrwerksbestandteile werden an Prüfständen oder durch den Abgleich mit realen Fahrdynamikmessungen ermittelt. Für die durchgeführte Studie kann auf ein bereits bestehendes Simulationsmodell für ein vergleichbares Versuchsfahrzeug zurückgegriffen werden. Das Modell wird um die Möglichkeit erweitert, einen vorgegebenen HA-Lenkwinkel δ_h im Moment der Bremsbetätigung aufzuschalten. Darüber hinaus werden die Lenkungskenlinie und weitere Fahrzeugparameter wie die exakte Achslastverteilung an das Versuchsfahrzeug aus der Realstudie angepasst. Bei der nachgebildeten Hinterradverstellung wird die Verstelldynamik der verwendeten Linearaktorik aus der Realstudie hinsichtlich Totzeit (0,1 s ab Bremsbeginn) und Verstellgeschwindigkeit (4°/s) berücksichtigt.

⁴⁰⁵ Hahlbrock et al. (2011): Die Entstehung des CFK-Fahrsimulators für Daimler

⁴⁰⁶ Dragon (1996): FADYS Fahrdynamikmodell, S. 117ff

⁴⁰⁷ Baumann (2003): Untersuchungen zur dynamischen Rollstabilität, S. 54f

FADYS bildet nach Bild 3.9 gemeinsam mit dem Hexapod-Fahrsimulator und dem Fahrer einen geschlossenen Regelkreis. Die Versuchssteuerung leitet zusätzlich die benötigten Manöveranweisungen zur Abbildung der Versuchsfahrbahn und der Verkehrssituation an den Fahrsimulator weiter. Am Fahrsimulator kann im Gegensatz zur Realstudie eine automatisierte Ablaufsteuerung implementiert werden, die im Anschluss an die Abfrage der subjektiven Beherrschbarkeit direkt das nächste Manöver initiiert, Details siehe Kapitel 4.2.

3.5.2 FADYS Modellvalidierung

Neben der Möglichkeit einer realitätsnahen Bewegungsdarstellung am Daimler AG-Fahrsimulator hängt die Vergleichbarkeit der Bewegungsdarstellung zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie maßgeblich von der Eignung des verwendeten Simulationsprogramms ab, sowohl das Grundfahrzeugverhalten als auch Hinterradlenkeingriffe valide nachstellen zu können. Zum Nachweis der Eignung des an den Versuchsträger der Realstudie angepassten Simulationsmodells werden in Bild 3.10 der benötigte Lenkradwinkel (links) und das auftretende Lenkradmoment (rechts) während eines Lenkungs-zuziehens bei 100 km/h über der Querschleunigung dargestellt. Sowohl der Lenkradwinkel als auch das Lenkradmoment aus der Simulation folgen der Messung ohne nennenswerte Abweichung. Lediglich die maximal erzielte Querschleunigung des Testfahrzeug aus Bild 3.10 (rechts) wird durch das Simulationsmodell nicht vollständig erreicht. Bis hin zu einer Querschleunigung von ca. 8 m/s^2 kann jedoch von einem identischen stationären Lenkverhalten ausgegangen werden. Das virtuelle Testfahrzeug wurde am Daimler AG-Fahrsimulator zudem in dynamischen Spurwechseltests von den zugehörigen Baureihen-Experten eindeutig als Mercedes-Benz C-Klasse des Typs *S204* mit der entsprechenden Lenkungs- und Fahrwerksvariante subjektiv bewertet und bestätigt.

Bild 3.11 (links) vergleicht den Zeitverlauf von drei verschiedenen Open-Loop-Gierstörungen in FADYS-Simulation und Messungen des Versuchsfahrzeugs. Die Gegenüberstellung der Gierstörungen belegt, dass bei identischen Maximalwerten der Gierstörungen ein nahezu identischer Zeitverlauf erzielt werden kann. Dies bestätigt auch die Übersicht der Zeitverzögerungen der jeweiligen Maximalwerte der Gierstörungen ab Bremsbeginn aus Bild 3.11 (rechts) mit einer identischen HA-Verstellgeschwindigkeit von $4^\circ/\text{s}$ in Simulation und realer Messung. Eine signifikante Abweichung zwischen Simulation und Testfahrzeug ist auch hier nicht erkennbar. Das FADYS-Simulationsmodell ist in der Lage, sowohl das Grundfahrzeugverhalten als auch die Aufschaltung von Gierstörungen durch eine Hinterradverstellung valide darzustellen. Die betragsmäßig geringsten Gierstörungen von ca. $2^\circ/\text{s}$ treten hierbei ca. 0,4 s nach Bremsbeginn auf, während die maximale Gierstörung in der Realstudie von $16^\circ/\text{s}$ erst

nach ca. 0,8 s verzeichnet wird. Die Ursache ist eine begrenzte Stellgeschwindigkeit von $\dot{\delta}_h = 4^\circ/\text{s}$ der Linearaktorik des Versuchsträgers.

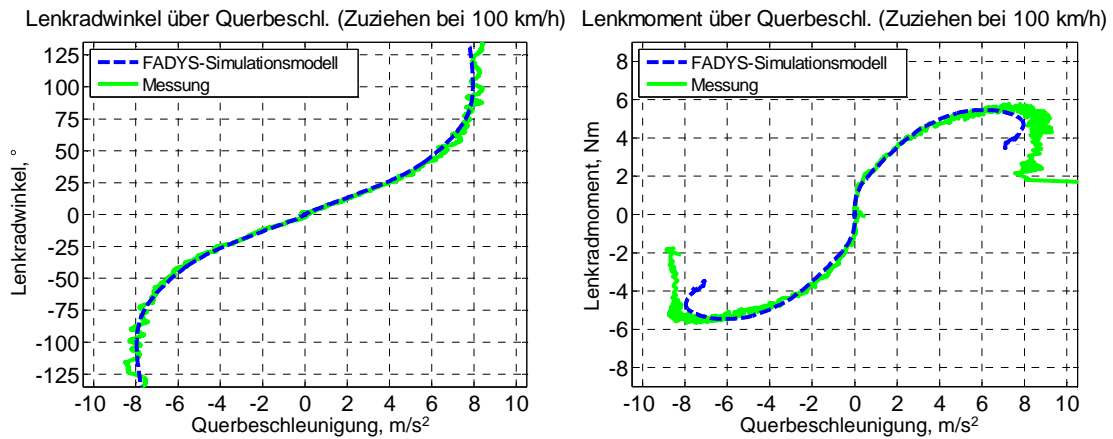


Bild 3.10 Vergleich des Eigenlenkverhaltens und des Lenkmoments von FADYS-Simulationsmodell und dem verwendeten Versuchsfahrzeug

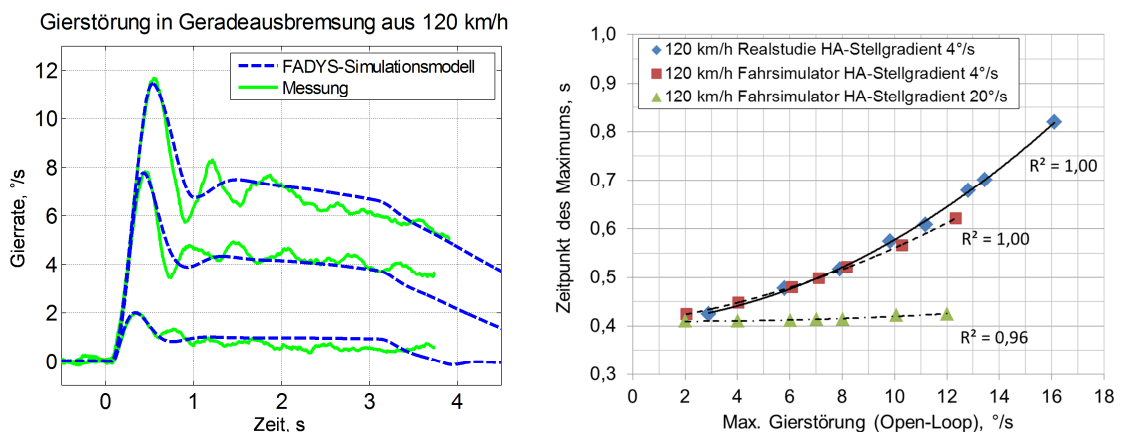


Bild 3.11 Vergleich des Zeitverlaufs der aufgeschalteten Gierstörungen von FADYS-Simulationsmodell und dem verwendeten Versuchsfahrzeug

Bild 3.11 (rechts) zeigt die zusätzliche Versuchsvariante der Geradeausbremsung aus 120 km/h am Fahrsimulator mit erhöhter HA-Verstellgeschwindigkeit (20°/s statt 4°/s). Infolge der schnelleren Verstellung werden hohe Gierstörungen ebenfalls bereits ca. 0,4 s nach Bremsbeginn erzielt. Eine weitere Erhöhung der Verstellgeschwindigkeit $\dot{\delta}_h$ führt hingegen zu keiner weiteren Reduktion der Verzugszeit. Diese Beobachtung erscheint plausibel, da selbst der zugehörige HA-Störwinkel der maximalen Gierstörungsausprägung bei 120 km/h ($\Delta\dot{\psi}_{\max} = 12^\circ/\text{s}$; $\delta_{h,\max} = 1,33^\circ$) mit einer Verstellgeschwindigkeit von $\dot{\delta}_h = 20^\circ/\text{s}$ bereits 67 ms nach Lenkbeginn anliegt, was in etwa der Dauer einer Umdrehung des verwendeten Reifentyps bei 120 km/h entspricht (ca. 60 ms). Eine weiter gesteigerte Verstellgeschwindigkeit bewirkt aufgrund der Berücksichtigung des Ein-

laufverhaltens eines Reifens⁴⁰⁸ durch FADYS keinen weiter beschleunigten Anstieg der Seitenkraft.

Um den möglichen Einfluss einer geringeren Verzugszeit des Gierstörungsmaximums auf die resultierende Beherrschbarkeit einer identischen Gierstörung auszublenden, wird der Verstellgradient der Hinterachslenkung bei Geradeausbremsungen aus 180 km/h auf die erzielten Verzugszeiten in Geradeausbremsung aus 120 km/h angepasst. Hierfür ist eine minimale Reduzierung des Verstellgradienten von 4°/s auf ca. 3,3°/s notwendig.

3.6 Fazit

Zur Beurteilung des Zusammenhangs zwischen den charakteristischen Fahrsicherheitskennwerten in Bremsmanövern und der resultierenden Beherrschbarkeit durch Normalfahrer sollen Geradeaus- und Kurvenbremsungen mit Geschwindigkeiten von 80 km/h (Kurvenbremsung) bis hin zu 180 km/h (Geradeausbremsung) durchgeführt werden. Die gewählte Breite der mit Pylonen begrenzten Fahrgassen richtet sich dabei mit Ausnahme des Kurventeilstücks nach den in Deutschland üblichen Mindestfahrspurbreiten des jeweiligen Streckentyps (2,5 m in Autobahnbaustellen, 3,5 m auf Autobahnen). In Kurvenfahrt werden aufgrund einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse ebenfalls 2,5 m Fahrstreifenbreite verwendet. Das Testkonzept zur Bewertung von Gierstörungen umfasst insgesamt 51 Testvarianten, die mit jeweils mindestens 30 verschiedenen Normalfahrern pro Variante absolviert werden müssen. Im Gegensatz zu bisherigen Probandenstudien soll in dieser Arbeit das objektive Kurshaltevermögen - repräsentiert durch auftretende Fahrstreifenverletzungen, Kursabweichungen und den minimalen Abstand zur Fahrstreifenbegrenzung - ermittelt werden. Auf Basis der bewährten Störbeurteilungsskala⁴⁰⁹ von Neukum/Krüger wird zudem eine eigene Beherrschbarkeitsskala abgeleitet, die zur subjektiven Beurteilung des Grundfahrzeugverhaltens in Brems- und Ausweichtests verwendet werden kann. In einer aktiven Hinterradverstellung wird das geeignete Testinstrument zur Variation des Fahrzeugverhaltens in Brems- und Ausweichtests identifiziert. Über Lenkwinkelsprünge an der Hinterachse können in allen Testmanövern reproduzierbare Gierstörungen $\Delta\dot{\psi}_{1s/\max} > 10^\circ/\text{s}$ angeregt werden. Durch ein querbeschleunigungsproportionales Mitlenken der Hinterachse resultiert zudem eine deutlich reduzierte Gierstabilität bei identischen Lenkradwinkleingaben. Eine Untersuchung der Beherrschbarkeit von hohen Schwimmwinkeln soll in einem Ausweichtest durchgeführt werden.

⁴⁰⁸ Reimpell, Sponagel (1988): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage, S. 195ff

⁴⁰⁹ Neukum, Krüger (2003): Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, S. 303

Die Untersuchung der Beherrschbarkeit von Gierstörungen im Hochgeschwindigkeitsbereich bis 180 km/h erfolgt am Fahrsimulator der Daimler AG. Der Fahrsimulator bietet durch seine realitätsnahe Bewegungs- und Umgebungsdarstellung gute Voraussetzungen für die zu prüfende Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Bremssituationen. Das Simulationsmodell zur Bewegungssteuerung des Fahrsimulators zeigt eine valide Anpassung des Grundfahrzeugverhaltens und des Fahrzeugverhaltens infolge von Hinterradlenkeingriffen an das eingesetzte Testfahrzeug aus der Realstudie.

4 Durchführung und Methodik der Auswertung

In der folgenden Durchführung der Studie soll das resultierende Kurshaltevermögen und die subjektive Beherrschbarkeit von Normalfahrern in Abhängigkeit der Variation von charakteristischen Bewegungskenngrößen durch eine Hinterradverstellung ermittelt werden. Zur Umsetzung des in Kapitel 3 abgeleiteten Versuchskonzepts wird ein Versuchsfahrzeug mit der benötigten Hinterradverstellung ausgerüstet und mit Messtechnik zur Erfassung der Bewegungsgrößen und der exakten Position des Fahrzeugs versehen. Die Durchführung ist in die Realstudie auf dem Testgelände in Papenburg bis 120 km/h und eine Folgestudie am Fahrsimulator bis 180 km/h unterteilt.

4.1 Durchführung der Realstudie im kontrollierten Feld

4.1.1 Versuchsfahrzeug



Bild 4.1 Verwendeter Versuchsträger mit Hinterradverstellung und Messtechnikaufbau

Bild 4.1 zeigt das Versuchsfahrzeug des Typs Mercedes-Benz C-Klasse (S204) mit Messtechnikaufbau und Leistungselektronik zur Ansteuerung der Hinterradverstellung im Kofferraum des Fahrzeugs. Durch die Zusatzgewichte der beiden 12 V-Batterien sowie des höheren Gewichts der beiden Linearaktoren an der Hinterachse, die anstelle der Querlenker verbaut werden, ist die Gewichtsverteilung des Fahrzeugs nach Tabelle 4.1 in Richtung eines minimal hecklastigen Fahrzeugs verschoben (Gewichtsverteilung VA/HA 48/52 %). Das messfertige Gesamtgewicht inklusive Fahrer und Beifahrer liegt mit 1934 kg jedoch im üblichen Bereich heutiger Mittel- und Oberklassefahrzeuge.

Tabelle 4.1 Fahrzeugdaten des messfertigen Versuchsfahrzeugs

Mercedes Benz C-Klasse Kombi (S204), Modelljahr: 2009					
Gewicht (messfertig)	Radstand	Spurbreite		Gewichtsverteilung VA/HA [%]	Reifen
		vorne	hinten		
1934 kg	2,760 m	1,545	1,548	48/52	225/45 R17

4.1.2 Probandenkollektiv und Testvarianten

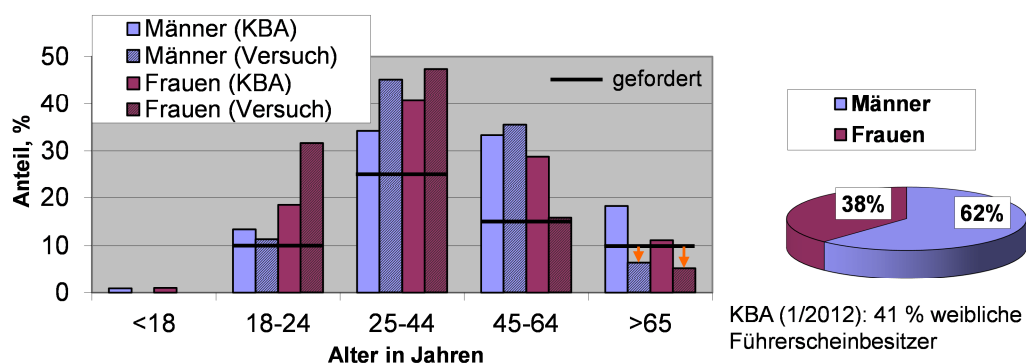


Bild 4.2 Übersicht der Alters- und Geschlechtsverteilung der akquirierten Probanden (Realstudie) im Vergleich zur Statistik der Führerscheinbesitzer in Deutschland (nach Kraftfahrtbundesamt KBA, Stand 1/2012)

In Kapitel 3.3 wurde auf die benötigte Probandenanzahl und die Forderung einer repräsentativen Alters- und Geschlechtsverteilung des Probandenkollektivs im Hinblick auf die statistische Führerscheinvverteilung in Deutschland eingegangen. Bild 4.2 zeigt die erzielte Zusammensetzung des Probandenkollektivs von 100 Normalfahrern in der Studie auf einem Testgelände („Realstudie“). Der Anteil weiblicher Probanden an der Gesamtverteilung entspricht mit 38 % der Vorgabe von 41 % ± 5 % und somit annähernd der tatsächlichen Verteilung. Auch die Forderung nach mindestens jeweils 10 % Anteil männlicher und weiblicher Fahrer in der Altersgruppe 18-24 Jahre, > 25 % in der Altersgruppe 25-44 Jahre und > 15 % in der Altersgruppe 45-64 Jahre kann erfüllt werden. Lediglich oberhalb von 65 Jahren sind anstelle der geforderten 10 % Anteil nur 6 % der männlichen und 5 % der weiblichen Testpersonen im Probandenkollektiv der Realstudie enthalten. Die Probandenverteilung kann in Summe als annähernd repräsentativ für die Verteilung von Normalfahrern im öffentlichen Straßenverkehr angesehen werden.

In Tabelle 4.2 ist die Anzahl der absolvierten Testvarianten mit Lenkwinkelsprung an der Hinterachse und die Anzahl aller Ausweichtests mit verändertem Mitlenkfaktor an der Hinterachse aufgelistet. Die geforderte Probandenanzahl von $n > 30$ unterschiedlicher Testpersonen kann bis auf die ungestörte Geradeausbremsung aus 120 km/h (nur $n = 29$) in jedem Bremsmanöver erzielt werden. In jeweils $n = 24-27$ Fahrten pro Variante können mittels Differential-GPS die exakten Kursverlaufsdaten erfasst werden (geringer Anteil an Ausfällen aufgrund technischen Defekts). Die jeweils erste Testvariante (Geradeausbremsung aus 120 km/h mit verschiedenen Stellwinkelaufschaltungen) wird bei $n = 53$ Fahrern als Referenzfahrt am Ende der Versuchsreihe wiederholt, um Gewöhnungseffekte zu prüfen. In ungebremster Geradeaus- und Kurvenfahrt mit 80 km/h konnte hingegen nicht in jeder Variante die geforderte Mindestanzahl von 30 verschiedenen auswertbaren Probandenfahrten pro Variante erzielt werden ($n_{\min} = 25$).

Tabelle 4.2 Erzielte Abdeckung der Versuchsvarianten durch das Probandenkollektiv in der Realstudie

Testmanöver in der Realstudie	HA-Stellwinkel-Varianten, °								
	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
Geradeausfahrt mit 120 km/h	Probandenanzahl (n)								
gebremst:	29	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30
Referenzfahrten:	6	6	6	6	5	5	6	6	7
Geradeausfahrt mit 80 km/h	Probandenanzahl (n)								
gebremst:	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30
ungebremst:	29		≥30		29		27		≥30
Kurvenfahrt mit 80 km/h	Probandenanzahl (n)								
gebremst:	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30
ungebremst:	≥30		≥30		≥30		25		≥30
Ausweichtest mit 80 km/h	Mitlenkfaktor k_{prop}					Σ Probanden: 100			
	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20				
80 km/h:	Probandenanzahl (n)								
	31	33	37	25	37				

In den durchgeführten Ausweichtests wird wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben keine Gleichverteilung der Testpersonen auf die fünf vorkonfigurierten Varianten des querschleunigungsproportionalen Mitlenkfaktors k_{prop} gewählt. Die variierten Mitlenkfaktoren werden aufgrund der beobachteten Verteilung der resultierenden Schwimmwinkel während der durchgeführten Ausweichtests hin zu höheren Mitlenkfaktoren verschoben, um eine ausreichende Abdeckung des Schwimmwinkelbereichs $\beta_{SP/HA}$ zwischen 5-10° zu erzielen.

4.1.3 Geradeaus- und Kurvenbremsungen aus 80-120 km/h

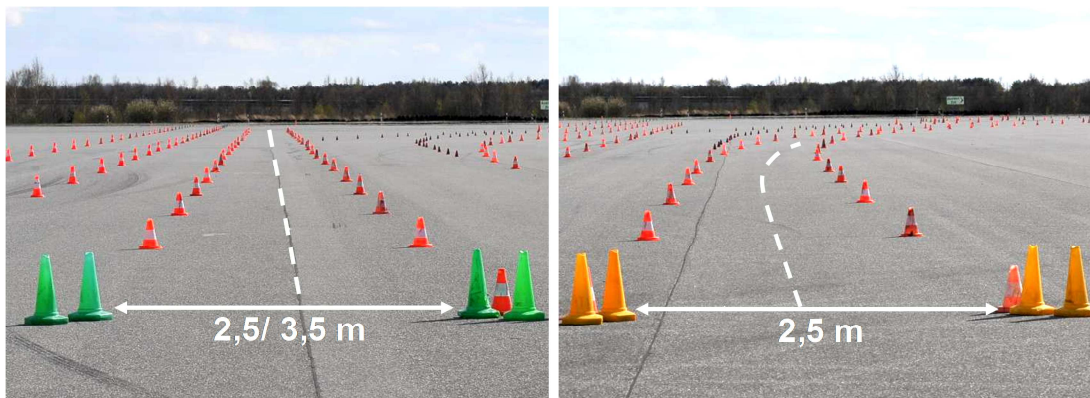


Bild 4.3 Versuchslayout der Pylonen-begrenzten Fahrgassen in Geradeaus- und Kurvenbremsung

Die durchgeführten Geradeaus- und Kurvenbremsungen aus 80 km/h und 120 km/h werden - wie in Kapitel 3.3 definiert - durch die Gestaltung eines Fahrstreifens mit Pylonen-Begrenzung dargestellt, siehe Bild 4.3. Die Fahrstreifenbreite von 2,5/3,5 m in Geradeausbremsung und 2,5 m in Kurvenbremsung entspricht dem Abstand zwischen den jeweiligen Innenkanten der begrenzenden Pylonen. Nach Einfahrt in die Pylonengasse mit der jeweils festgelegten Fahrgeschwindigkeit erfolgt eine Bremsanforderung

durch den beifahrenden Versuchsbegleiter an den Fahrer. Die anschließende Bremsung löst nach Kapitel 3.4 automatisch einen Lenkeingriff an der Hinterachse aus, der wiederum wie beschrieben zu einer Gierbewegung des Fahrzeugs führt. Im Vorfeld der Versuchsdurchführung werden die Probanden darauf hingewiesen, dass ein Verlassen des Fahrstreifens und der Kontakt mit einer Pylone gleichbedeutend mit einem möglichen Unfallereignis in einer realen Fahrsituation sind. Im direkten Anschluss an die Durchführung wird die subjektive Beherrschbarkeit nach der in Kapitel 3.3.3 abgeleiteten „Beherrschbarkeitsskala“ abgefragt. Durch den Versuchsbegleiter (Beifahrer) sowie einen außenstehenden Beobachter werden alle aufgetretenen Pylonenkontakte dokumentiert. Während jeder Einfahrt werden zudem alle Bewegungsgrößen des Fahrzeugs und der exakte Kursverlauf des Fahrzeugs mittels entsprechender Messtechnik und Differential-GPS erfasst, Details siehe Kapitel 4.3.

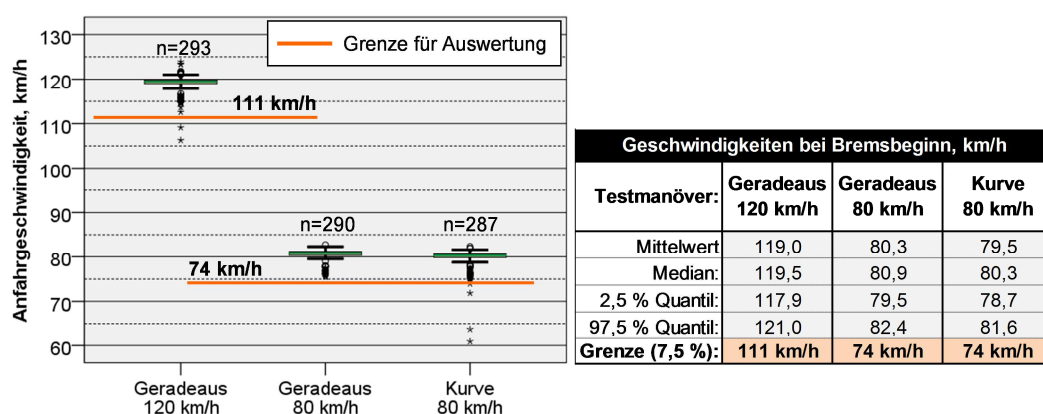


Bild 4.4 Erzielte Anfangsgeschwindigkeiten vor Bremsbeginn mittels Limiter-Funktion

Durch die Verwendung der „Limiter“-Funktion des Testfahrzeugs können die Zielgeschwindigkeiten (80 und 120 km/h) vor Bremsbeginn von fast allen Probanden reproduzierbar erreicht werden, siehe Boxplot-Darstellung und zugehörige Tabelle in Bild 4.4. Bei Anwendung des Limiters kann die definierte Zielgeschwindigkeit manuell eingestellt und das Fahrpedal anschließend dauerhaft betätigt werden. Das Antriebsmoment wird bei Annäherung an die Zielgeschwindigkeit automatisch reduziert und die Zielgeschwindigkeit eingeregelt. In Geradeausbremsung erzielen 95 % aller Testpersonen eine Fahrgeschwindigkeit unmittelbar vor Bremsbeginn zwischen 117,9 und 121 km/h. Die Ausgangsfahrgeschwindigkeiten bei Geradeaus- und Kurvenbremsung mit einer Zielgeschwindigkeit von 80 km/h liegen bei 95 % aller Probanden im Bereich zwischen 79,5-82,4 km/h (Geradeausbremsung) bzw. 78,7-81,6 % (Kurvenbremsung). Die wenigen in Bild 4.4 erkennbaren Fahrten mit deutlichen Abweichungen von der Zielgeschwindigkeit > 7,5 % fließen nicht in die Bewertung mit ein. In der Übersicht aller ausgewerteten Wiederholfahrten von identischen Versuchsvarianten aus Tabelle 4.2 sind bereits nur die ausgewerteten Testfahrten enthalten. Auch in den weiteren durchgeführten Testmanö-

vern, wie z.B. den ungebremsten Geradeaus- und Kurvenfahrten sowie dem Ausweich-test, wird durch die Verwendung der Limiter-Funktion eine reproduzierbare Ausgangs-fahrgeschwindigkeit erzielt.

4.1.4 Ausweichtest

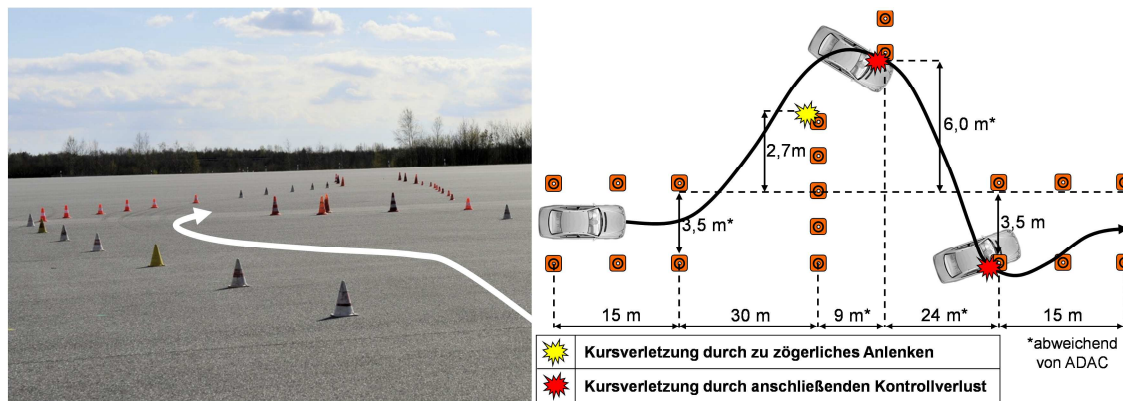


Bild 4.5 Versuchslayout des Ausweichtests auf dem Prüfgelände (links) und Klassifizierung der erfassten Kursverletzungen (rechts)

Der Aufbau des abgewandelten ADAC-Ausweichtests erfolgt ebenfalls nach der Vorgabe des Versuchskonzepts. Um die Kursführungsaufgabe für die Normalfahrer eindeutiger zu gestalten, wird der gesamte Fahrschlauch seitlich von Pylonen begrenzt, siehe Bild 4.5 (links). Die Anfahrt auf das zu umfahrende Hindernis erfolgt mit limitierten 80 km/h Fahrgeschwindigkeit. Die Probanden werden angewiesen, den Fuß während der Durchfahrt nach Möglichkeit nicht vom Fahrpedal zu nehmen, um die Fahrgeschwindigkeit auch während der anschließenden Ausweichsituation vergleichbar zu halten. Die dauerhafte Fahrpedalbetätigung während des Anlenkens wird bereits in einer Übungsfahrt angewandt und eingeübt. Durch diese Anweisung soll eine ungewünschte Bremsung der Fahrer vor dem Ausweichen vermieden werden, die in Ausweichsituationen bei mehr als 10 % der Fahrer beobachtet werden kann.^{410,411}

Die eigentliche Versuchsvariante – die Variation des destabilisierenden Mitlenkfaktors der Hinterachse k_{prop} – wird erst unmittelbar vor dem Moment des ersten Einlenkens in der Bewertungsfahrt aktiv geschaltet. Im Anschluss an die Durchfahrt erfolgt analog zur Durchführung der Bremsmanöver eine direkte Beurteilung der Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch die Testperson. Bei der Bewertung von Fahrstreifenverletzungen bietet sich in den Ausweichtests nach Bild 4.5 (rechts) jedoch eine Unterscheidung an: Kollisionen mit den Hindernis-Pylonen in Ausgangsfahrtrichtung werden in dieser Arbeit auf ein zu zögerliches Anlenken durch den Fahrer bzw. ein zu geringes

⁴¹⁰ Braber, Bukman (1998): Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Verhaltens bei Ausweichmanövern

⁴¹¹ Bruder et al. (2007): Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung

Ansprechverhalten des Fahrzeugs auf die Lenkbefehle des Fahrers zurückgeführt, während Pylonenkontakte im weiteren Verlauf des Ausweichtests auf eine fehlende Stabilisierbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch die Testperson hinsichtlich einer sicheren Kursführung hinweisen.

Von den theoretisch möglichen 200 Ausweichtests aus zwei Versuchsvarianten mit 100 Normalfahrern konnten insgesamt nur 163 auswertbare Fahrten durchgeführt werden. Ca. 20 % der Normalfahrer werden von der Schwierigkeit der Fahraufgabe überfordert und führen keine zielgerichteten Lenkbewegungen aus, um das Hindernis zu umfahren. Es resultieren ausschließlich Kollisionen mit mehreren Pylonen des Hindernisses oder die Fahrgeschwindigkeit wird vor Erreichen des Hindernisses stark reduziert. Es werden ausschließlich Fahrten ausgewertet, in denen der Fahrer eine Anfahrgeschwindigkeit von 74 km/h überschreitet und maximal die in Bild 4.5 (rechts) markierte äußere Pylone des Hindernisses touchiert wird. Bei Kollisionen mit mehreren Pylonen des Hindernisses oder einer Unterschreitung der Fahrgeschwindigkeit von 74 km/h vor dem ersten Anlenken durch Bremsung oder zu zögerliche Fahrpedalbetätigung wird die Testfahrt für ungültig erklärt und geht nicht in die Auswertung mit ein.

4.2 Durchführung der Fahrsimulatorstudie

Die Fahrsimulatorstudie am Daimler-Fahrsimulator in Sindelfingen findet im Anschluss an die „Realstudie“ in Papenburg statt. Aufgrund der örtlichen Distanz kann nicht auf das Probandenkollektiv der Realstudie aus Papenburg zurückgegriffen werden. Zusätzlich findet eine Anpassung des Versuchslayouts zur optimierten Ablaufsteuerung der Bewertung von Gierstörungen in Bremsmanövern am Fahrsimulator statt. Die Zusammensetzung des Probandenkollektivs erfolgt analog zur Realstudie nach der Vorgabe des Versuchskonzepts aus Kapitel 3.3.1.

4.2.1 Probandenkollektiv und Testvarianten

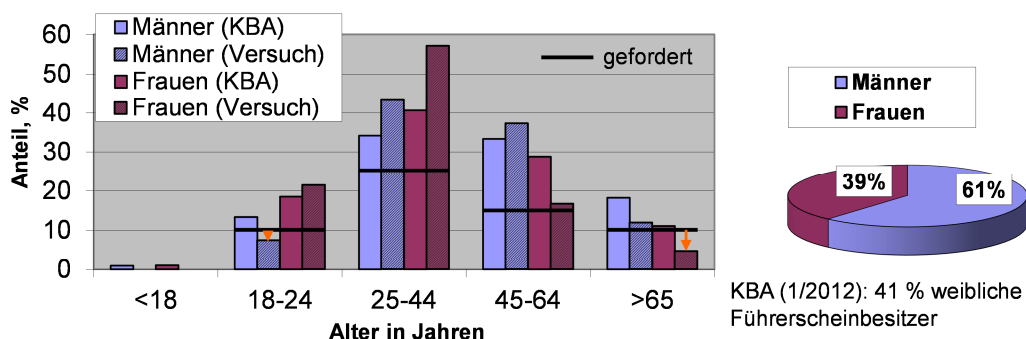


Bild 4.6 Übersicht der Alters- und Geschlechtsverteilung der akquirierten Probanden (Fahrsimulatorstudie) im Vergleich zur Statistik der Führerscheinbesitzer in Deutschland (KBA, Stand 1/2012)

Das eingesetzte Probandenkollektiv aus $n = 104$ Normalfahrern zeigt nach Bild 4.6 ebenfalls eine gute Repräsentanz der realen Führerscheinbesitze: Der Anteil weiblicher Probanden am gesamten Probandenkollektiv liegt mit 39 % nur 2 % unterhalb der statistischen Verteilung in Deutschland (Stand 01/2012). Im Gegensatz zur Realstudie können auch ältere männliche Fahrer (> 65 Jahre) mit dem geforderten Anteil > 10 % an allen männlichen Teilnehmern akquiriert werden. Der Anteil männlicher Versuchsteilnehmer in der Altersgruppe von 18-24 Jahre liegt mit ca. 7,5 % hingegen ebenso wie die Anzahl der weiblichen Versuchsteilnehmer oberhalb von 65 Jahre mit ca. 5 % knapp unterhalb des im Vorfeld geforderten Anteils von 10 %.

Tabelle 4.3 Erzielte Abdeckung der Versuchsvarianten durch das Probandenkollektiv am Fahrsimulator

Testmanöver am Fahrsimulator	Gierstörungen-Varianten, %s									
	0	2	4	5	6	7	8	10	12	
Geradeausbremsung aus 120 km/h	Probandenanzahl (n)									
Verstellgradient 47s:	≥30	≥30	≥30	-	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	
Verstellgradient 207s:	≥30	≥30	≥30	-	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	
Geradeausbremsung aus 180 km/h	Probandenanzahl (n)									
Verstellgradient ca. 3,37s	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	≥30	-	
Referenzfahrten:	14	14	12	11	13	14	12	14	-	
Σ Probanden: 104										

Mit 104 Testpersonen kann die geforderte Anzahl von mindestens 30 verschiedenen Fahrern pro Testvariante nach Tabelle 4.3 in jeder Variante erzielt bzw. überschritten werden. Die Referenzfahrten zur Prüfung von eventuellen Gewöhnungseffekten werden als jeweils letzte Fahrt eines Probanden mit mindestens zehn verschiedenen Fahrern pro Gierstörungsvariante in Geradeausbremsungen aus 180 km/h durchgeführt.

4.2.2 Geradeausbremsungen aus 120-180 km/h

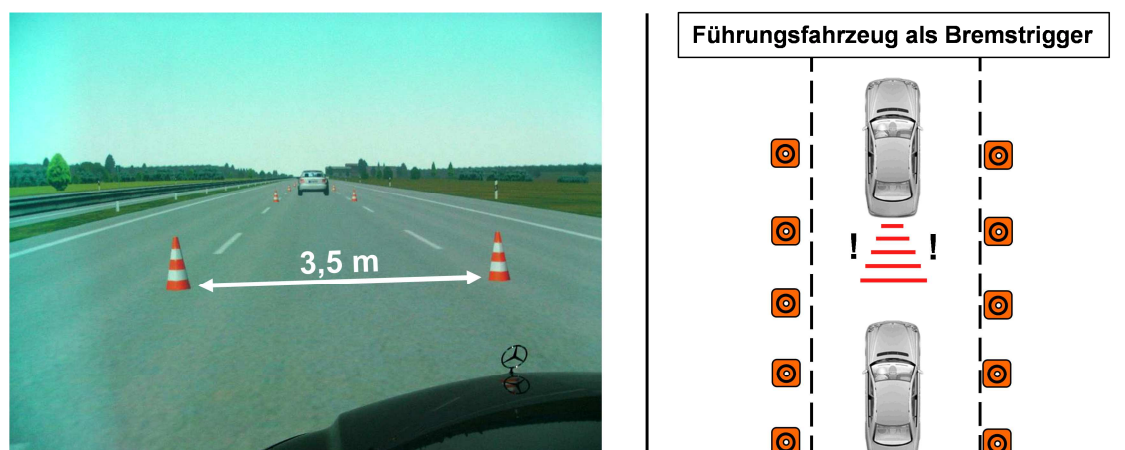


Bild 4.7 Versuchslayout der Pylonen-begrenzten Fahrgasse mit vorausfahrendem Führungsfahrzeug am Fahrsimulator

Im Testablauf am Fahrsimulator wird eine automatisierte Versuchssteuerung eingesetzt, d.h. die feste Reihenfolge der vorgesehenen Gierstörungsvarianten und Fahrgeschwin-

digkeiten ist in einem Ablaufplan gespeichert. Zur weiteren Vereinfachung der Durchführung wird auf dem verwendeten Streckenmodul „3-streifige Autobahn“ nach Bild 4.7 ein vorausfahrendes „Führungsfahrzeug“ eingesetzt, welches die Probanden an die vorgegebene Zielgeschwindigkeit heranführt (120 oder 180 km/h) und anschließend zur Bremsung zwingt. Die Zielgeschwindigkeit wird wie in der Realstudie über eine Limiter-Funktion eingestellt und gehalten. Nach Erreichen der Zielgeschwindigkeit und nach Ablauf einer variierten Zeitdauer verzögert das vorausfahrende Fahrzeug. Die auf diese Weise erzwungene Bremsreaktion des Fahrers aktiviert wiederum analog zur Realstudie die automatische Aufschaltung eines variierten HA-Lenkswinkels. Somit kann eine realistische (alltägliche) Fahrsituation nachgestellt werden. Nach Abfrage der subjektiven Beherrschbarkeit wird die nächste Variante des Ablaufplans ausgelöst und das Führungsfahrzeug beschleunigt erneut auf die Zielgeschwindigkeit. Durch die Kopplung der Bremsauslösung des Führungsfahrzeugs an ein Erreichen der definierten Zielgeschwindigkeit mit einem Zielkorridor von ± 2 km/h werden in allen Versuchsvarianten der Fahrsimulatorstudie im Vergleich zur Realstudie noch geringere Abweichungen der Ausgangsfahrgeschwindigkeit beobachtet.

4.3 Verwendete Messtechnik

Tabelle 4.4 Übersicht der verwendeten Messtechnik

Messgröße	Einheit	Messtechnik	Frequenz	Messgenauigkeit
Fahrgeschwindigkeit	km/h	Correvit S350 Aqua (1)	200 Hz	$\pm 0,2 \%$
Schwimmwinkel	Grad (°)		200 Hz	$\pm 0,2^\circ$
Längsbeschleunigung	m/s^2	GPS gestützte Kreiselplattform iTraceRT-F200-E (2)	200 Hz	$\pm 0,0001 \text{ m/s}^2$
Querbearschleunigung			200 Hz	
Gierrate	$^\circ/\text{s}$	Fzg.-internes CAN Signal	200 Hz	$\pm 0,2^\circ/\text{h}$
Gierwinkel	Grad (°)		200 Hz	$\pm 0,01^\circ$
Lenkradwinkel	Grad (°)	iTraceRT-F200-E (1) + iREF-L1L2 RTK GPS Basisstation (2)	200 Hz	$\pm 1^\circ$
Fzg.-Position	m		100 Hz	$\pm 0,02 \text{ m}$

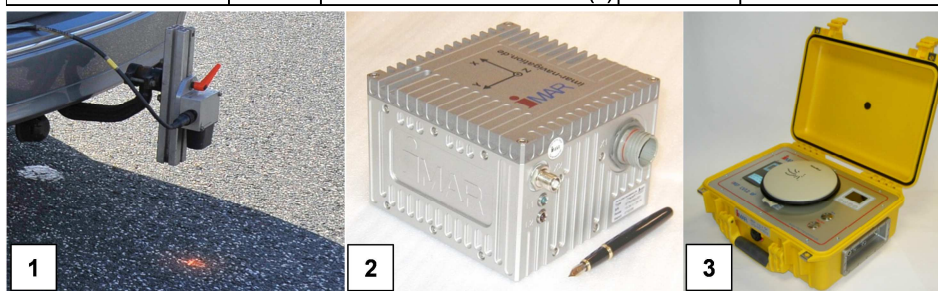


Tabelle 4.4 zeigt die verwendete Messtechnik und die erzielten Messgenauigkeiten zur Erfassung der benötigten Bewegungsgrößen, Lenktätigkeiten und der Position des Fahrzeugs. Der Fahrgeschwindigkeitsvektor v_{corr} und der Schwimmwinkel am Ort der Leuchtpunktmessung β_{corr} werden anhand des bereits in Kapitel 2.1.3 vorgestellten Correvit-Sensors ermittelt. Der Correvit-Sensor ist nach Tabelle 4.4 (unten links) mittig am

Heck des Testfahrzeugs befestigt und überträgt die Messsignale mit einer Messfrequenz von 200 Hz an die zentrale Messrechneinheit. Die Berechnung der Fahrgeschwindigkeit in Fahrzeuglängsrichtung erfolgt mit dem bekannten Schwimmwinkel am Messpunkt β_{corr} zu

$$v_x = v_{corr} \cdot \cos(\beta_{corr}) \quad (4.1)$$

Anhand der erfassten Gierrate $\dot{\psi}$ und der bekannten Fahrzeugeigenschaften wie Spurbreite an Hinter- und Vorderachse $b_{HA/VA}$, Radstand l , Abstand der Hinter- und Vorderachse zum Schwerpunkt des Fahrzeugs l_h, l_v und dem vermessenen Abstand von Correvit zu Hinterachse $l_{corr,HA}$ kann die Quergeschwindigkeit $v_{y,i}$ an einem beliebigen Punkt des Fahrzeugs mit bekanntem Längs- und Querabstand zum Correvit $l_{x,i}, l_{y,i}$ bestimmt werden

$$v_{y,i} = v_{corr} \cdot \sin(\beta_{corr}) - \dot{\psi} \cdot \sqrt{l_{x,i}^2 + l_{y,i}^2} \cdot \cos\left[\arctan\left(\frac{l_{y,i}}{l_{x,i}}\right)\right] \quad (4.2)$$

Somit ergeben sich die für diese Arbeit gesuchten Schwimmwinkel an der Hinter- und Vorderachse $\beta_{HA/SP}$ zu

$$\beta_{HA} = \arctan\left(\frac{v_{y,HA}}{v_x}\right) = \arctan\left(\frac{v_{corr} \cdot \sin(\beta_{corr}) - \dot{\psi} \cdot l_{corr,HA}}{v_{corr} \cdot \cos(\beta_{corr})}\right) \quad (4.3)$$

und

$$\beta_{SP} = \arctan\left(\frac{v_{corr} \cdot \sin(\beta_{corr}) - \dot{\psi} \cdot (l_{corr,HA} + l_h)}{v_{corr} \cdot \cos(\beta_{corr})}\right). \quad (4.4)$$

Die Gierrate $\dot{\psi}$, der Gierwinkel ψ sowie die horizontierten Beschleunigungen des Fahrzeugs in Längs- und Querrichtung $a_{x,y}$ werden über eine GPS-gestützte Kreiselplattform erfasst. Auf den Einbau eines Messlenkrads zur präzisen Messung von Lenkradwinkel und Lenkmoment wird hingegen verzichtet, um die Testpersonen nicht unnötig zu irritieren. Die Genauigkeit des ausgewerteten Lenkradwinkelsignals über Fahrzeug-CAN von ca. 1° Lenkwinkel ist für die Untersuchung der Lenktätigkeiten des Fahrers in dieser Studie ausreichend.

Neben der Dokumentation von Pylonenkontakten besteht für eine detailliertere Auswertung des objektiven Kurshaltevermögens die Notwendigkeit, eine möglichst exakte Nachverfolgung des erzielten Kursverlaufs durchführen zu können. Zu diesem Zweck wird die GPS-gestützte Kreiselplattform (iTraceRT-F200-E) durch den Einsatz einer GPS-Basisstation (iREF-L1L2 RTK) zu einem Differential-GPS erweitert (iREF-L1L2 RTK).

4.3.1 Funktionsweise des verwendeten Differential-GPS-Systems

Eine übliche GPS-gestützte Kreiselplattform (z.B. iTraceRT-F200-E) kann die Position des Fahrzeugs (bzw. der Kreiselplattform) laut Herstellerangaben der Firma iMAR nur mit einer Genauigkeit von etwa 1,8 m erfassen. Die Ursache liegt in der Differenz zwischen der tatsächlichen und theoretischen Laufzeit der Signale zwischen der GPS-Plattform und den zur Ortung verwendeten Satelliten. Die theoretische Laufzeit entspricht aufgrund von atmosphärischen Störungen hierbei nicht den tatsächlichen Laufzeiten. Somit kommt es zu Verfälschungen der ermittelten Position. Bei Verwendung einer Basisstation (in dieser Studie: iREF-L1L2 RTK) wird die Position der Basisstation über eine Dauer von mehreren Minuten hinweg anhand von GPS-Daten exakt bestimmt. Durch die Kenntnis der exakten Position kann die Basisstation im Anschluss die tatsächlichen Laufzeiten berechnen und in Differenz zu den theoretischen Laufzeiten setzen, deren Verwendung zu einer ungenauen Positionserfassung führen würde. Diese Differenz wird von der Basisstation über Funkkontakt einmal pro Sekunde an die im Fahrzeug platzierte GPS-gestützte Kreiselplattform übertragen. Anhand der bekannten Differenz aus den theoretischen und tatsächlichen Laufzeiten kann die Position der im Fzg. platzierten Kreiselplattform mit einer deutlich gesteigerten Genauigkeit von ca. 2 cm bestimmt werden (Herstellerangabe iMAR). Die Einhaltung dieser Herstellerangabe wird vor Ort durch wiederholte Messung einer identischen Fahrzeugposition verifiziert.

4.3.2 Kursverlaufbestimmung in Geradeausfahrt

Durch die Verwendung eines Differential-GPS ist die Voraussetzung geschaffen, den Kursverlauf des Fahrzeugs exakt nachverfolgen zu können. Der Kursverlauf muss jedoch auf die durchfahrenen Pylonengassen bezogen werden, um die seitliche Kursabweichung in Bezug auf die Fahrstreifenbegrenzung bestimmen zu können. Zudem ist für die anschließende Analyse eines sicheren Fahrtverlaufs nicht die Position am Ort der Kreiselplattform (Kofferraum) entscheidend, sondern die Position der Fahrzeugkarosserie in Bezug zur Fahrstreifenbegrenzung. In dieser Arbeit wird daher die Position und seitliche Kursabweichung der äußeren Reifenschultern aller vier Räder als Bewertungskriterium verwendet. Durch die Wahl dieses Kriteriums kann eine Auswertung der Annäherung oder des tatsächlichen Überfahrens der Fahrstreifenbegrenzung mit den Rädern des Testfahrzeugs erfolgen.

Bild 4.8 zeigt die Ermittlung des Kursverlaufs bzw. der Position einer Reifenschulter in Bezug auf die Fahrstreifenbegrenzung in geradlinig verlaufenden Fahrgassen (Geradeausbremsung). Zur Ermittlung der Lage des Fahrstreifens wird die Position der Innenkante der ersten und letzten in Bild 4.8 (links) hervorgehobenen Pylonen bestimmt.

Durch die Verbindung der beiden Punkte (1 und 2) resultiert die linke Fahrstreifenbegrenzung bzw. das Koordinatensystem mit X-Achse X' , Y-Achse Y' und Gierwinkel ψ' .

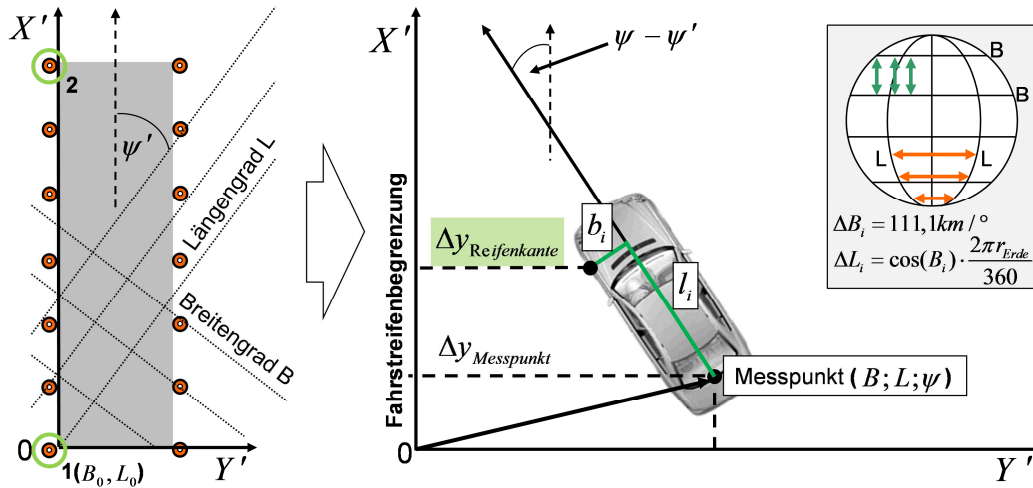


Bild 4.8 Bestimmung des Kursverlaufs mittels Differential-GPS in Geradeausfahrt

Das Koordinatensystem der Fahrgasse schneidet das GPS-Koordinatensystem aus den orthogonal zueinander verlaufenden Längen- und Breitengraden im Transformationswinkel ψ' . Der Abstand zwischen zwei Breitengraden ΔB_i ist konstant (ca. 111,1 km/°), während der Abstand von zwei benachbarten Längengraden ΔL_i in Abhängigkeit des Breitengrades bestimmt werden kann.

$$\Delta L_i = \cos(B_i) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{Erde}}}{360} \quad (4.5)$$

Auf dem Messgelände in Papenburg beträgt der Abstand zweier Längengrade ca. 66,86 km/°. Die Querabweichung des Messpunkts zur Fahrstreifenbegrenzung kann in den Längsfahrgassen mit den gemessenen Werten der Längen- und Breitengrade L, B nach Bild 4.8 zu

$$\Delta y_{\text{Messpunkt}} = (L - L_0) \cdot \Delta L_i \cdot \cos(\psi') + (B - B_0) \cdot \Delta B_i \cdot \sin(\psi') \quad (4.6)$$

bestimmt werden. Mit dem gemessenen Gierwinkel des Fahrzeugs ψ , dem Längsabstand der Kreiselplattform zur jeweiligen Fahrzeugachse l_i und dem Abstand der Fahrzeugmitte zur äußeren Reifenkante b_i kann – ebenfalls in Bild 4.8 (rechts) skizziert – eine Umrechnung des seitlichen Abstands zur Fahrstreifenbegrenzung vom Messpunkt auf die gewünschte Position

$$\Delta y_{\text{Reifenkante}} = \Delta y_{\text{Messpunkt}} - l_i \cdot \sin(\psi - \psi') - b_i \cdot \cos(\psi - \psi') \quad (4.7)$$

erfolgen. Diese Berechnung wird für alle 4 Reifenkanten in Bezug auf den Abstand zur linken und rechten Fahrstreifenbegrenzung durchgeführt.

4.3.3 Kursverlaufbestimmung in Kurvenfahrt

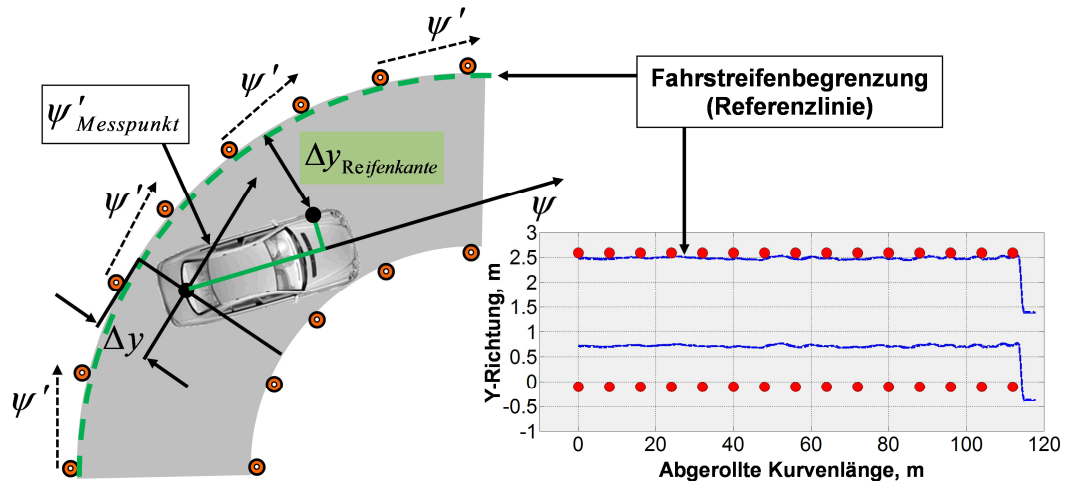


Bild 4.9 Bestimmung des Kursverlaufs mittels Differential-GPS in Kurvenfahrt

In Kurvenfahrt ist die Bestimmung des Kursverlaufs hingegen nicht durch die Ermittlung einer geraden Referenzlinie durch zwei Begrenzungspunkte möglich. Nach Bild 4.9 ist der entsprechende Gierwinkel ψ' über der Kreisbahn nicht konstant, sondern folgt der Kurvengeometrie. Es bestehen zwei Möglichkeiten zur Bestimmung des Kursverlaufs innerhalb der Pylonengasse:

- 1.: Annahme eines idealen Kreisradius ($123 \text{ m} \pm \text{halbe Fahrstreifenbreite}$) und Verwendung von ebenfalls zwei Referenzpunkten auf der Fahrstreifenbegrenzung zur Fixierung des idealen Kreisbogens.
- 2.: Vollständige Einzelpunktvermessung der Fahrstreifenbegrenzung zur Bildung einer gekrümmten Referenzlinie.

In dieser Arbeit wird aufgrund der Unabwägbarkeit des exakt getroffenen Kreisradius eine Einzelpunktvermessung der kompletten Fahrstreifenbegrenzung gewählt. Die auftretenden Abweichungen sind in diesem Verfahren nur auf einen lokalen Positionierungsfehler des Fahrzeugs bei der Vermessung der Fahrstreifenbegrenzung bezogen. Ein systematischer Fehler bei fehlerhafter Annahme eines exakten Kreisradius ist somit ausgeschlossen. Die Kurve wird in zwei Wiederholungsfahrten $< 5 \text{ km/h}$ mit einer möglichst exakten Überdeckung der Außenkante des linken kurvenäußeren Vorderrads mit der Fahrstreifenbegrenzung abgefahren. Bei einer Messfrequenz von 100 Hz entspricht dies einem maximalen Abstand zwischen zwei Referenzpunkten der Messung von $\Delta l_{ref} = 1,4 \text{ cm}$.

Die Ermittlung des Abstands eines beliebigen Punktes des Fahrzeugs von der Fahrstreifenbegrenzung kann nun durch die Suche nach dem Minimum aus der Differenz der absoluten Position des ausgewählten Punktes und allen Messpunkten der Referenzlinie erfolgen.

$$\Delta y_i = \min \left(\sqrt{[(L_i - L_{ref}) \cdot \Delta L_i]^2 + [(B_i - B_{ref}) \cdot \Delta B_i]^2} \right) \quad (4.8)$$

Liegt ein Messpunkt hierbei genau zwischen 2 Referenzpunkten und exakt auf der eigentlichen Referenzlinie würde bei punktueller Abstandsbetrachtung ein maximaler Fehler der Abstandsbestimmung von $1/2 \cdot \Delta l_{ref} = 0,7$ cm auftreten. Um diesen Fehler zu vermeiden, wird zwischen dem ermittelten Referenzpunkt mit minimalem Abstand zum relevanten Fahrzeugpunkt und den beiden benachbarten Referenzpunkten linear interpoliert und der minimale Abstand des auszuwertenden Fahrzeugpunktes zu dieser Interpolationslinie bestimmt. Der mögliche Fehler infolge dieser linearen Interpolation resultiert nur noch aus der Krümmung der Referenzlinie zwischen den Referenzpunkten, siehe Abbildung in Tabelle 4.5 (rechts)

Die absolute Position eines Punktes im GPS-Koordinatensystem (L_i, B_i) – z.B. der Außenkante des Reifens – kann ausgehend vom Messpunkt zu

$$L_i = L_{Messpunkt} + \frac{l_i \cdot \sin(\psi)}{\Delta L_i} + \frac{b_i \cdot \cos(\psi)}{\Delta B_i} \quad (4.9)$$

und

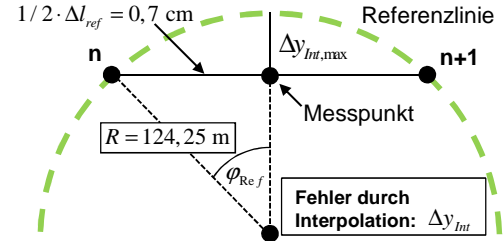
$$B_i = B_{Messpunkt} + \frac{l_i \cdot \cos(\psi)}{\Delta L_i} + \frac{b_i \cdot \sin(\psi)}{\Delta B_i}. \quad (4.10)$$

bestimmt werden. Bild 4.9 zeigt das Ergebnis der Kursverlaufbestimmung für die Reifenaußenkante des linken Vorderrades in einer Wiederholfahrt an der Pylonenbegrenzung. Der berechnete Kursverlauf entspricht einer plausiblen Folgefahrt des linken Vorderrades entlang der Fahrstreifenbegrenzung. Während der Plausibilisierungsfahrt treten keine Abweichungen von der Referenzlinie $> \text{ca. } 5$ cm auf. Zusätzlich soll eine detaillierte Fehlerabschätzung der Abstandsbestimmung eines beliebigen Fahrzeugpunktes von der Fahrstreifenbegrenzung erfolgen.

4.3.4 Fehlerabschätzung der Abstandsbestimmung

Tabelle 4.5 Fehleranteile bei der Abstandsbestimmung zur Fahrstreifenbegrenzung

Fehleranteile der Messgrößen			
Messgröße	Fehler	Fehleranteile	Fehlerbetrag
Position: $y_{\text{Messpunkt}}$	Δy_{Mess}	GPS: Δy_{GPS}	2,0 cm
Referenzlinie: y_{ref}	Δy_{ref}	GPS: Δy_{GPS}	2,0 cm
		Interpolation: Δy_{Int}	0,00002 cm
		Positionierung: Δy_{Pos}	3,0 cm
Gierwinkel: ψ	$\Delta \psi$	Gierwinkel: $\Delta \psi$	0,01°



Die Genauigkeit des berechneten Abstands eines Fahrzeugpunktes zur Pylonenbegrenzung wird durch die Fehleranteile aus Tabelle 4.5 (links) bestimmt. Neben der Ungenauigkeit der Positionserfassung von $\Delta y_{\text{GPS}} = 2 \text{ cm}$ treten zusätzliche Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Referenzlinie durch Interpolation zwischen zwei Referenzpunkten (Δy_{Int}) und die Ungenauigkeit der Positionierung des Fahrzeugs an den Pylonen (Δy_{Pos}) auf, siehe Tabelle 4.5 (links). Der maximal mögliche Fehler durch die angewandte Interpolation zwischen zwei Referenzpunkten $\Delta y_{\text{Int,max}}$ ergibt sich nach der Skizze aus Tabelle 4.5 (rechts) zu

$$\Delta y_{\text{Int,max}} = R - \frac{1/2 \cdot \Delta l_{\text{ref}}}{\tan \left[\arcsin \left(\frac{1/2 \cdot \Delta l_{\text{ref}}}{R} \right) \right]} = 0,2 \mu\text{m} \quad (4.11)$$

und ist somit vernachlässigbar. Der Positionierungsfehler Δy_{Pos} aus der Ungenauigkeit der Aufstellung der Pylonen und der Positionierung des Fahrzeugs zur Vermessung an den Pylonen wird über die maximal aufgetretene seitliche Abweichung der Reifenaußenkante des Fahrzeugs in Bezug zur markierten Referenzposition einer Pylone während der Referenzfahrt auf $\Delta y_{\text{Pos}} = \text{ca. } 3 \text{ cm}$ geschätzt. Hinzu kommt der Abstandsfehler aufgrund einer Umrechnung der Position des Messpunktes auf die interessierende Position der Reifenaußenkanten durch den Gierwinkelfehler $\Delta \psi = 0,01^\circ$.

Der gesamte Fehler der Abstandsberechnung für einen vom Messpunkt abweichenden Fahrzeugpunkt y_i ergibt sich sowohl in Kurvenfahrt als auch in Geradeausfahrt aus der Berechnungsgleichung der Differenz Δy_i zwischen einer fehlerbehafteten Referenzlinienposition y_{ref} und der mittels fehlerbehaftetem Gierwinkel ψ und fehlerbehaftetem Messpunkt $y_{\text{Messpunkt}}$ bestimmten Position des auszuwertenden Fahrzeugpunktes y_i .

$$\Delta y_i = \left[y_{\text{Messpunkt}} - l_i \cdot \sin(\psi - \psi') - b_i \cdot \cos(\psi - \psi') \right] - y_{\text{ref}} \quad (4.12)$$

Für die Kurvenfahrt bedeutet diese Vereinfachung analog zur Geradeausfahrt, dass die Position eines Messpunktes und die Position der Referenzlinie (L_i, B_i) nur durch ihren Abstandsanteil y bezogen auf die Referenzlinie ausgedrückt werden. In Geradeausfahrt ist der Gierwinkel ψ' der Fahrstreifenbegrenzung konstant, während der zugehörige Gierwinkel ψ' der Referenzlinie in Kurvenfahrt von der Position des auszuwertenden Fahrzeugpunktes abhängt, siehe Bild 4.9. Zur Fehlerbetrachtung wird weiterhin vereinfachend $\psi - \psi' = 0$ angenommen, d.h. der auszuwertende Fahrzeugpunkt bewegt sich parallel zur Fahrstreifenbegrenzung. Durch diese Vereinfachungen kann der mittlere quadratische Fehler des berechneten Abstands der Reifenaußenkante eines Rades an der Vorderachse von der tatsächlichen Fahrstreifenbegrenzung aus Gleichung (4.12) nach der Theorie der Fehlerfortpflanzung⁴¹² mit $l_i = 3\text{m}$ Abstand der Vorderachse zur Position des Messpunkts allgemein zu

$$\Delta(\Delta y_i) = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta y_i}{\partial y_{\text{Mess}}} \cdot \Delta y_{\text{Mess}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta y_i}{\partial y_{\text{ref}}} \cdot \Delta y_{\text{ref}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta y_i}{\partial \psi} \cdot \Delta \psi \right)^2} \quad (4.13)$$

und unter Berücksichtigung der Zusammensetzung von Δ_{ref} aus Δy_{Pos} und Δy_{GPS} zu

$$\Delta(\Delta y_i) = \pm \sqrt{2 \cdot (\Delta y_{\text{GPS}})^2 + (\Delta y_{\text{Pos}})^2 + (\Delta \psi \cdot l_i)^2} = \pm 4,12\text{cm} \quad (4.14)$$

berechnet werden. Diese Fehlerabschätzung trifft in guter Näherung die beobachteten Maximalwerte der Abweichungen bei einer Wiederholfahrt an der Fahrstreifenbegrenzung. Die Genauigkeit der Kursverlaufbestimmung kann in dieser Arbeit also mit ca. $\pm 4\text{ cm}$ angegeben werden.

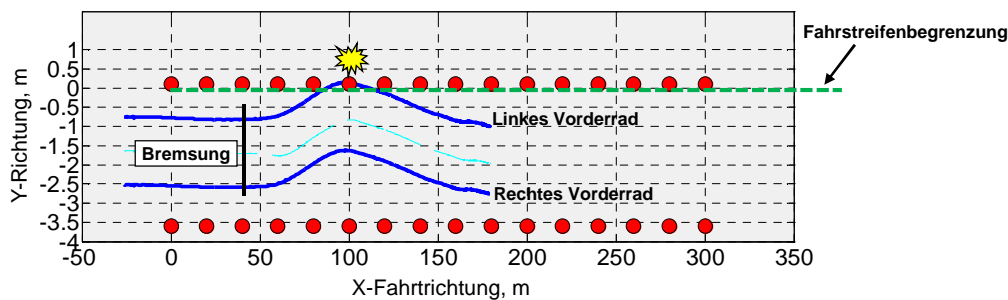


Bild 4.10 Ermittelter Kursverlauf einer Testperson infolge einer Gierstörung in Geradeausbremsung aus 120 km/h mit Pylonenkontakt

Für die Genauigkeit der Kursverlaufbestimmung spricht auch der Zusammenhang zwischen den beobachteten Pylonenkontakten und den dazugehörigen minimalen Abständen der Reifenaußenkanten von der Fahrstreifenbegrenzung: Bei insgesamt 128 beo-

⁴¹² Stetter (1992): Meßtechnik an Maschinen und Anlagen

bachteten Testfahrten mit variiertem Gierstörungsaufschaltung und anschließendem Pylonenkontakt werden in 98,4 % der Fälle auch durch das Differential-GPS Fahrstreifenverletzungen nachgewiesen, siehe z.B. in einer Geradeausbremsung aus 120 km/h nach Bild 4.10.

Am Fahrsimulator muss hingegen keine Messtechnik zur Erfassung des Kursverlaufs eingesetzt werden. Es liegt eine exakte Kenntnis der virtuellen Position des Fahrzeugs auf der Versuchsstrecke vor.

4.4 Methodik der Auswertung

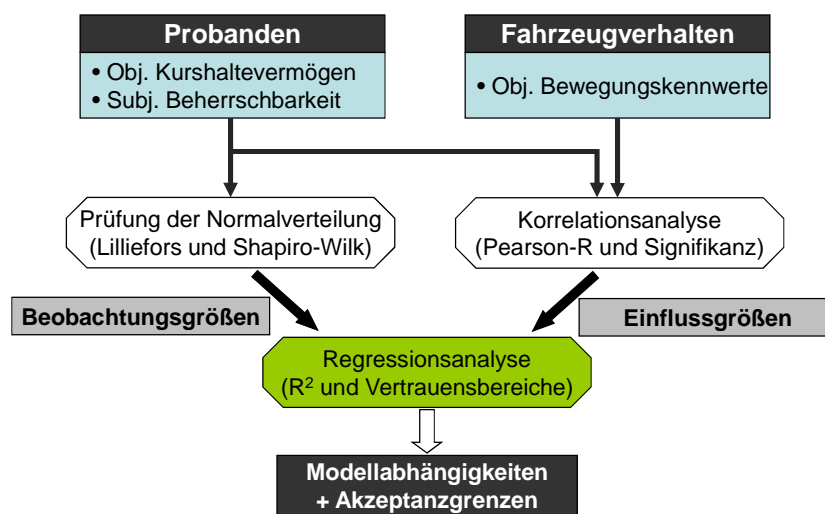


Bild 4.11 Methodik der Auswertung zur Ableitung von Modellabhängigkeiten und Akzeptanzgrenzen für die charakteristischen Open-Loop-Bewegungskenngrößen

Im Anschluss an die Versuchsdurchführungen der beiden Studien auf einer realen Teststrecke und am Fahrsimulator soll eine Gegenüberstellung des objektiven Kurshaltevermögens und der subjektiven Beherrschbarkeit mit den objektiven Bewegungskennwerten der Fahrdynamik erfolgen. Das Ziel der in Bild 4.11 dargestellten Methodik ist es, zunächst durch Korrelationsanalysen diejenigen Einflussgrößen zu identifizieren, die den stärksten Zusammenhang mit der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit aufweisen. Dieser Zusammenhang soll anschließend mittels Regressionsanalyse auf konkrete Modellabhängigkeiten übertragen werden. Die Kenntnis der konkreten Modellabhängigkeiten für die Beobachtungsgrößen (subjektive und objektive Beherrschbarkeit) soll in einem letzten Schritt die Ableitung von Akzeptanzgrenzen für die objektiven Fahreigenschaftskennwerte ermöglichen. In den folgenden Abschnitten wird auf die Ermittlung der benötigten Kennwerte aus den vorhandenen Messdatenaufzeichnungen eingegangen und es werden die eingesetzten Methoden aus dem Bereich der Statistik diskutiert.

4.4.1 Kennwerte und Messdatenaufbereitung

Tabelle 4.6 zeigt die betrachteten Kennwerte und Bewertungskriterien in den Brems- und Ausweichmanövern zur Bewertung der aufgestellten Hypothesen in Kapitel 3.2.

Tabelle 4.6 Übersicht der verwendeten Kennwerte zur Gegenüberstellung der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit mit den objektiven Bewegungskennwerten des Fahrzeugs

Untersuchte Kennwerte (Beobachtungsgrößen und Einflussgrößen)				
Testmanöver (Realstudie + Fahr Simulator)	Beobachtungsgrößen		Einflussgrößen	
	Open-Loop	Closed-Loop	Open-Loop	Closed-Loop
Geraderausbremsung 80 km/h	-	Subjektivbeurteilung B_i	$\Delta\dot{\psi}_{1s}$ $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ $\Delta\dot{\psi}_{ref,1s}$ $\Delta\dot{\psi}_{ref,\max}$	-
Kurvenbremsung 80 km/h		Kurshaltung $\Delta y_{\max,4s}$ $\Delta y_{ref,min,4s}$	$\Delta a_{y,\max}$ $\Delta a_{y,1s}$	
Geradeausbremsung 120 km/h		Lenkarbeit (Integral von δ_H)	$\beta_{HA,\max}$ $\beta_{SP,\max}$ $\beta_{HA,1s}$ $\beta_{SP,1s}$	
Geradeausbremsung 180 km/h		Pylonenkontakte	δ_h	
Ausweichtest 80 km/h	-	Subjektivbeurteilung $B_{s,i}$ Lenkarbeit (Integral von δ_H) Pylonenkontakte	k_{prop}	$\beta_{HA,\max}$ $\beta_{SP,\max}$ $\dot{\psi}_{\max}$ $a_{y,\max}$

Die Beobachtungsgrößen beinhalten diejenigen Kennwerte und Kriterien, die Aufschluss über die Beherrschbarkeit einer Situation geben sollen. Diese Beobachtungsgrößen werden ausschließlich innerhalb der Closed-Loop-Durchführung ermittelt und bestehen innerhalb der Bremsmanöver aus den Kriterien

- Subjektivbeurteilung der Beherrschbarkeit $B_{s,i}$,
- objektives Kurshaltevermögen (maximale Kursabweichung $\Delta y_{\max,4s}$ und minimaler Fahrstreifenabstand $\Delta y_{ref,min,4s}$ innerhalb von 4 Sekunden nach Bremsbeginn),
- resultierende Lenkarbeit der Testperson zur Stabilisierung des Fahrzeugs in der Fahrgasse (Aufintegration der Lenkradgeschwindigkeit über 3 Sekunden) und
- beobachtete Unfallereignisse mit den begrenzenden Pylonen.

Die Wahl des Auswertzeitraums der Kurshaltungskennwerte $\Delta y_{\max,4s}$ und $\Delta y_{ref,min,4s}$ von jeweils vier Sekunden nach Bremsbeginn ist an eine Studie zur Untersuchung von Lenksystemstörungen⁴¹³ angelehnt. Nach dieser Studie sind die Korrekturhandlungen des Fahrers nach spätestens vier Sekunden abgeschlossen. Für die Auswertung der Lenkarbeit wird in dieser Arbeit ein minimal reduzierter Zeitraum von nur drei Sekunden gewählt, um eine zeitliche Überschneidung des Auswertzeitraums mit einer bereits abgeschlossenen Korrekturhandlung zu reduzieren. Da die Wahl des Sollkurses innerhalb eines Ausweichtests von der Lenkstrategie der jeweiligen Testperson abhängt, werden in den Ausweichtests nur die subjektiven Beherrschbarkeit, die Lenkarbeit zwischen

⁴¹³ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

Ein- und Ausfahrgasse und die tatsächlich aufgetretenen Fahrstreifenverletzungen als Maß für die objektive Beherrschbarkeit erfasst.

Die genannten Beobachtungsgrößen sollen den objektiven Fahreigenschaftskennwerten (Einflussgrößen) gegenübergestellt werden. Die charakteristischen Einflussgrößen der Bremsmanöver werden dabei ausschließlich in reproduzierbaren Open-Loop-Messungen mit fixiertem Lenkrad und bei mittlerer Bremsintensität ermittelt. Die vermuteten relevanten Kennwerte sind nach Kapitel 2.2.2

- die maximale Abweichung der Gierrate $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ und die Abweichung der Gierrate zum Zeitpunkt eine Sekunde nach Bremsbeginn $\Delta\dot{\psi}_{1s}$ in allen Bremsmanövern
- die Abweichung der Gierrate von der Referenzgierrate in Kurvenbremsung $\Delta\dot{\psi}_{ref,\max}, \Delta\dot{\psi}_{ref,1s}$,
- die Abweichung der Querbesehleunigung in Geradeaus- und Kurvenbremsung $\Delta a_{y,\max}, \Delta a_{y,1s}$ und
- der Schwimmwinkel im Schwerpunkt und an der Hinterachse $\beta_{HA,\max}, \beta_{HA,1s}, \beta_{SP,\max}, \beta_{SP,1s}$.

Der Zusammenhang zwischen der resultierenden Beherrschbarkeit und dem eingesetzten Stellwinkel der Hinterachse δ_h wird ebenfalls geprüft. In den Ausweichsituationen können in Open-Loop-Durchführung außer der Stellvariante selbst (Mitlenkfaktor k_{prop}) keine geeigneten objektiven Bewegungskennwerte ermittelt werden. Die resultierenden Schwimmwinkel $\beta_{HA,\max}, \beta_{SP,\max}$ und die Maximalwerte der Gierrate $\dot{\psi}_{\max}$ und Querbesehleunigung $a_{y,\max}$ werden in jedem Closed-Loop-Testdurchlauf eines Probanden individuell erfasst und zur Auswertung anschließend in verschiedene Betragsklassen unterteilt.

Zur Ermittlung der charakteristischen Kennwerte aus den erfassten Bewegungsgrößen des Fahrzeugs - wie z.B. der Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ oder der Querbesehleunigungsabweichung $\Delta a_{y,\max}$ - muss eine Aufbereitung der Messdaten erfolgen, um eine Verfälschung der tatsächlichen Maximalwerte durch ein vorhandenes Signalrauschen oder durch Messartefakte zu vermeiden. Hierzu wird in dieser Arbeit das Verfahren einer „gleitenden Mittelwertbildung“ angewandt. Bei der gleitenden Mittelwertbildung wird über eine definierte Anzahl von Messpunkten bzw. definierte Messdauer (Spannweite d) ein Mittelwert gebildet. Bei einer gleitenden Mittelwertbildung besteht daher die Gefahr einer Verfälschung des tatsächlichen Nutzsignals, sofern die Mittelwertbildung über eine zu große Anzahl von Messpunkten bzw. eine zu große Messdauer

erfolgt. Die Wahl der geeigneten Spannweite erfolgt am Beispiel der Gierrate $\dot{\psi}(t)$ nach Bild 4.12 über Suche nach einem Sattelpunkt in der Differenz des gefilterten Maximalbetrags einer Gierstörung zum ungefilterten Maximalbetrag des Signals.

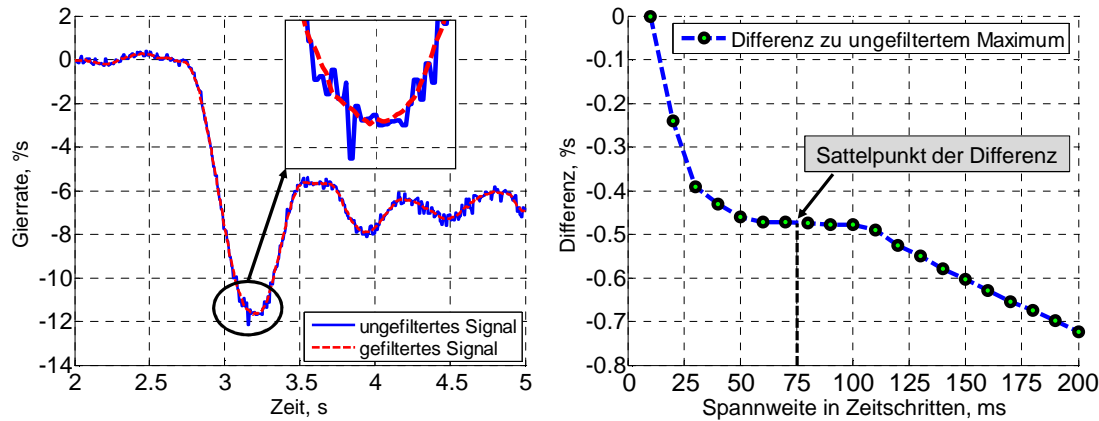


Bild 4.12 Filterung der Messsignale über eine gleitende Mittelwertbildung mit definierter Spannweite

Nach Bild 4.12 (rechts) tritt bei einer Spannweite von $d = 15$ (75 ms Messdauer) ein erkennbarer Sattelpunkt auf. Im Bereich dieses Sattelpunktes zwischen einer Spannweite von ca. $d = 10$ -20 (50-100 ms) tritt bei einer Änderung der Spannweite keine Änderung des ermittelten Maximalbetrags der Gierrate auf. Die Ausprägung eines Sattelpunktes ist somit ein deutliches Indiz für den Übergang einer vollständigen Signalglättung des Signals hin zu einer Verfälschung des Nutzsignals bei einer weiteren Erhöhung der Spannweite. In Bild 4.12 (links) ist der relevante Ausschnitt um den Bereich des auftretenden Gierstörungsmaximums des ungefilterten Signals und des gefilterten Signals mit einer Spannweite von $d = 15$ (75 ms) hervorgehoben. Bei dieser Spannweite tritt lediglich eine sichtbare Signalglättung und keine Verfälschung des Nutzsignals auf. In dieser Arbeit wird für die erfassten Messgrößen Giergeschwindigkeit, Querbeschleunigung und Schwimmwinkel daher eine Spannweite von $d = 15$ (75 ms) verwendet.

Als Ergebnis der Kennwertbildung liegen alle im Open-Loop oder Closed-Loop ermittelten Beobachtungsgrößen und Einflussgrößen für die weitere Analyse der Ergebnisse mittels statistischer Verfahren vor.

4.4.2 Statistische Methoden

Nach der in Bild 4.11 dargestellten Auswertungsmethodik soll durch eine Korrelationsanalyse zunächst untersucht werden, welche der charakteristischen objektiven Bewegungskennwerte am besten dazu geeignet sind, die ermittelte objektive und subjektive Beherrschbarkeit durch Normalfahrer zu erklären. Die beiden relevanten Kriterien der Korrelationsanalyse sind die Stärke des gefundenen Zusammenhangs - ausgedrückt durch den Korrelationskoeffizienten R_P nach Pearson - und das Signifikanzniveau α_s der

gefundenen Abhängigkeit, siehe z.B. Lozán /Kausch⁴¹⁴. Der Korrelationskoeffizient R_P beschreibt die Stärke des linearen Zusammenhangs zwischen den untersuchten Einflussgrößen und Beobachtungsgrößen und kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Ein Betrag nahe $R_P = 1$ entspricht dabei einem funktionalen Zusammenhang zwischen den beiden voneinander abhängigen Größen.⁴¹⁵ Zur Prüfung der Signifikanz α_s des vermuteten Zusammenhangs wird als Ausgangshypothese H_0 angenommen, es bestünde keine Abhängigkeit zwischen den beiden untersuchten Größen. Diese Hypothese wird nach Bortz et al.⁴¹⁶ nur dann zugunsten der Annahme einer vorhandenen Abhängigkeit verworfen, wenn die Wahrscheinlichkeit für eine fehlerhafte Ablehnung der Ausgangshypothese ein definiertes Signifikanzniveau α_s unterschreitet. Die Wahrscheinlichkeit der fehlerhaften Ablehnung der Ausgangshypothese wird als Fehler „1. Art“ bezeichnet und muss üblicherweise ein Signifikanzniveau zur Ablehnung der Ausgangshypothese von $\alpha_s = 0,05$ oder $0,01$ unterschreiten (5 % oder 1 % Signifikanzniveau).⁴¹⁷ Das Ergebnis der Korrelationsuntersuchung ist die Kenntnis der geeigneten Einflussgrößen zur Erklärung der festgestellten subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit.

Diese am besten geeigneten objektiven Bewegungskennwerte können nun verwendet werden, um die Modellabhängigkeit zwischen dem Fahrzeugverhalten und der resultierenden Beherrschbarkeit genauer zu quantifizieren. Hierzu werden in dieser Arbeit Regressionsanalysen mit linearen und quadratischen Modellansätzen durchgeführt. Das Ziel ist es, die Modellabhängigkeit durch eine Funktion nach dem Muster $f(\text{Bewegungskennwert}) = \text{objektive bzw. subjektive Beherrschbarkeit}$ beschreiben zu können. Das Bestimmtheitsmaß R^2 eines gewählten Modellansatzes wird nach Fahrmeir⁴¹⁸ zu

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \hat{\epsilon}_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.15)$$

berechnet und gibt Aufschluss über die Anpassungsgüte des Modellansatzes an die Beobachtungswerte. Hierbei entspricht y_i dem jeweiligen Beobachtungswert (abhängige Variable) an der Stelle x_i (erklärende Variable), \bar{y} dem Mittelwert aller Beobachtungswerte und \hat{y}_i dem Wert der Modellfunktion an der Stelle x_i . Zur Modellanpassung an die

⁴¹⁴ Lozán, Kausch (2007): Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler, 4. Auflage, S. 186ff

⁴¹⁵ Sachs, Hedderich (2009): Angewandte Statistik, 13. Auflage, S. 103

⁴¹⁶ Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 101

⁴¹⁷ Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 100f

⁴¹⁸ Fahrmeir et al. (2009): Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen, S. 99

Beobachtungsgrößen werden die Parameter des Modellansatzes so gewählt, dass die Summe aller quadrierten Abweichungen $\hat{\varepsilon}_i$ zwischen den Beobachtungsgrößen y_i und den zugehörigen Modellwerten \hat{y}_i

$$\sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.16)$$

einen minimalen Wert annimmt.⁴¹⁹ Das Bestimmtheitsmaß R^2 nach Gleichung (4.15) sagt also aus, welcher Anteil der Summe aller quadrierten Abweichungen der Beobachtungsgrößen y_i von ihrem Mittelwert \bar{y} durch den Modellansatz erklärt werden kann. Ein Bestimmtheitsmaß von 1 entspricht einer vollständigen Erklärung der Beobachtungsgrößen. Die resultierende Funktion zur Abbildung des Modellzusammenhangs bezieht sich für Werte von $R^2 < 1$ jedoch immer auf die Abhängigkeit des Mittelwerts der Beobachtungsgrößen von der erklärenden Variable. Daher werden zusätzlich Vertrauensbereiche (Konfidenzintervalle) für die Regression betrachtet.⁴²⁰ Diese bestehen in der Berechnung von Vertrauensbereichen für die Regressionskurve der prognostizierten Mittelwerte und für den Vorhersagebereich einer zukünftigen Einzelstichprobe auf einem Wahrscheinlichkeitsniveau von üblicherweise 95 %, Details siehe Lozán/Kausch.⁴²¹ Der Vertrauensbereich für einen Erwartungswert wird demnach auch „Vorhersagebereich“ genannt und kennzeichnet den Wertebereich, innerhalb dessen eine zukünftige Einzelstichprobe mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % zu erwarten ist.

Zur Konstruktion von Konfidenzintervallen und zur Durchführung von zahlreichen Hypothesentests (z.B. der Prüfung auf identische Mittelwerte zweier Stichproben mittels t-Test nach) ist die Kenntnis der Verteilungsmaße der Beobachtungsgrößen notwendig (Erwartungswerte, Varianzen).⁴²² In diesem Fall wird von „parametrischen“ Verfahren gesprochen.⁴²³ Daher wirken sich normalverteilte Beobachtungsgrößen positiv auf die Genauigkeit der Konfidenzintervalle und der Hypothesentests aus, während nicht normalverteilte Stichproben zu einer Unschärfe dieser Tests führen können.⁴²⁴ Die Prüfung der Normalverteilung für Stichprobenumfänge mit unbekannten Verteilungsmaßen kann auf Basis des Kolmogorov-Smirnov-Tests nach Lilliefors⁴²⁵ oder des Shapiro-Wilk-Tests⁴²⁶ erfolgen. Insbesondere der Shapiro-Wilk-Test gilt als effektive Methode zur

⁴¹⁹ Fahrmeir et al. (2009): Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen, S. 98

⁴²⁰ Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 196

⁴²¹ Lozán, Kausch (2007): Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler, 4. Auflage, S. 199ff

⁴²² Sachs, Hedderich (2009): Angewandte Statistik, 13. Auflage, S. 410

⁴²³ Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 130

⁴²⁴ Fahrmeir et al. (2009): Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen, S. 111ff

⁴²⁵ Sachs, Hedderich (2009): Angewandte Statistik, 13. Auflage, S. 396

⁴²⁶ Lozán, Kausch (2007): Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler, 4. Auflage, S. 83

Prüfung der Normalverteilungshypothese bei kleinen Stichprobenumfängen von $n < 20$ bis $n = 50$ und wird daher in dieser Arbeit ergänzend zum Lilliefors-Test verwendet. Im Gegensatz zur Prüfung auf signifikante Korrelationszusammenhänge wird bei der Prüfung der Normalverteilung als Ausgangshypothese H_0 angenommen, es läge tatsächlich eine Normalverteilung vor. Diese Hypothese wird nur verworfen, wenn die Wahrscheinlichkeit der fehlerhaften Beibehaltung dieser Hypothese größer als $1 - \alpha_s$ wird (Fehler „2. Art“, Signifikanzniveau üblicherweise $\alpha_s = 0,05$).⁴²⁷ Daher handelt es sich bei den genannten Tests um eine Prüfung der Normalverteilungshypothese, nicht aber um einen Nachweis der tatsächlichen Normalverteilung.

4.4.3 Prüfung auf Normalverteilung der Beobachtungsgrößen

Die Prüfung der Normalverteilungshypothese der zentralen Beobachtungsgrößen dieser Arbeit wird bereits in diesem Kapitel diskutiert, da das Ergebnis eine Aussage über die Güte und Anwendbarkeit der statistischen Methoden beinhaltet. Tabelle 4.7 zeigt die erzielten Signifikanzniveaus der subjektiven Beherrschbarkeit $B_{s,i}$ und der maximalen seitlichen Kursabweichung innerhalb von vier Sekunden nach Bremsbeginn $\Delta y_{\max,4s}$ nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lilliefors (KS) und Shapiro-Wilk-Test (SW). Die Prüfung erfolgt für jede der insgesamt 51 Gierstörungsvarianten aus 6 verschiedenen Bremsmanövern, die jeweils mit ca. $n = 30$ Wiederholfahrten abgedeckt sind. Es wird erwartet, dass die Beobachtungsgrößen bei fester Open-Loop-Gierstörung bzw. fester HA-Verstellung in der Closed-Loop-Studie normalverteilt sind (H_0).

Nach Tabelle 4.7 kann diese Normalverteilungshypothese H_0 nicht für alle Testvarianten beibehalten werden. Nur in 39,2 % der Fälle für die maximale Kursabweichung und in 35,3 % der Fälle für die Subjektivbeurteilung ist das Signifikanzniveau nach mindestens einem der beiden Testverfahren (KS + SW) größer als 0,05. In 60,2 % bzw. 64,7 % der Fälle müsste die Normalverteilungshypothese hingegen verworfen werden. Die Ursachen werden in der Detail-Betrachtung der einzelnen Verteilungen deutlich: Beide Testverfahren (KS und SW) reagieren sensibel auf „Ausreißer“, d.h. Einzelstichproben, die vom Erwartungswert um mehr als das 3-fache der Standardabweichung abweichen. Diese Ausreißer treten insbesondere bei der maximalen Kursabweichung auf und verfälschen das Testergebnis für die übrigen zur Normalverteilung tendierenden Kursabweichungen, siehe z.B. Variante Kurvenbremsung aus 80 km/h ohne beobachteten Ausreißer mit einem Stellwinkel von 1° (α_s nach Shapiro-Wilk = 0,79). Dennoch kann in dieser Arbeit keine Ausblendung der Ausreißer erfolgen, da zur Betrachtung der resultie-

⁴²⁷ Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 100f

renden Fahrsicherheit gerade diejenigen Einzelfahrten von Interesse sind, in denen eine hohe Kursabweichung infolge einer Gierstörung resultiert.

Tabelle 4.7 Signifikanzniveaus der Prüfung auf Normalverteilung für die subjektive und objektive Beherrschbarkeit in allen Bremsmanövern anhand Lilliefors-Test und Shapiro-Wilk-Test

Signifikanzniveaus der Normalverteilungshypothese																			
Realstudie	Kriterium	HA-Stellwinkel, °																	
		0,00		0,25		0,50		0,75		1,00		1,25		1,50		1,75		2,00	
		KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW
Geraderausbremsung 80 km/h	Kursabweichung:	0,18	0,00	0,00	0,00	0,13	0,02	0,01	0,00	0,20	0,79	0,20	0,09	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	Subjektivurteile:	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04	0,08	0,10	0,11	0,52	0,20	0,23	0,23
Kurvenbremsung 80 km/h	Kursabweichung:	0,20	0,02	0,20	0,01	0,02	0,04	0,20	0,33	0,02	0,01	0,11	0,24	0,01	0,00	0,20	0,16	0,02	0,00
	Subjektivurteile:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,04	0,01	0,03	0,00	0,01	0,02	0,01	0,10	0,16	0,00	0,01
Geradeausbremsung 120 km/h	Kursabweichung:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,15	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
	Subjektivurteile:	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,06	0,04	0,02	0,17	0,06	0,04	0,00	0,07	0,01	0,20	0,20	0,25
Fahrsimulator	Kriterium	Gierstörung, ‰																	
		0		2		4		5		6		7		8		10		12	
		KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW	KS	SW
Geradeausbremsung 120 km/h (HA-Stellgradient 47s)	Kursabweichung:	0,20	0,09	0,00	0,00	0,16	0,01	-	-	0,20	0,10	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Subjektivurteile:	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,04	-	-	0,00	0,01	0,02	0,01	0,11	0,13	0,09	0,12	0,20	0,61
Geradeausbremsung 120 km/h (HA-Stellgradient 207s)	Kursabweichung:	0,04	0,01	0,01	0,00	0,08	0,01	-	-	0,16	0,17	0,20	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	0,01
	Subjektivurteile:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	-	-	0,09	0,29	0,00	0,02	0,20	0,21	0,09	0,14	0,01	0,04
Geradeausbremsung 180 km/h	Kursabweichung:	0,01	0,00	0,04	0,01	0,20	0,81	0,00	0,00	0,19	0,17	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	-	-
	Subjektivurteile:	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,01	0,20	0,28	0,00	0,01	0,09	0,23	0,02	0,03	-	-
KS: Kolmogorov-Smirnov-Test nach Lilliefors; SW: Shapiro-Wilk-Test / markierte Felder: Normalverteilungshypothese wird nicht verworfen																			

Bei der Subjektivbeurteilung kommt es hingegen speziell bei niedrigen Stellwinkeln bzw. niedrigen Gierstörungen zu einer Häufung der einzelnen Beurteilungen auf niedrigen Werten der klassifizierten Beherrschbarkeitsskala. Hierdurch wird die Prüfung der Normalverteilungshypothese erschwert. Bei hohen Gierstörungen ($\Delta\dot{\psi}_{\max} \geq 6^\circ/\text{s}$) am Fahrsimulator bzw. hohen Stellwinkeln an der Hinterachse ($\delta_h \geq 1^\circ$) in der Realstudie wird erwartungsgemäß eine größere Varianz der Subjektivbeurteilungen innerhalb einer Störvariante erzielt. Infolge dieser höheren Varianz steigt der Anteil derjenigen Verteilungen, für die weiterhin eine Normalverteilung angenommen werden kann, auf 60,7 %. Auf Basis der durchgeführten Prüfungen der Normalverteilungshypothese kann zusammengefasst also keine generelle Aussage getroffen werden, ob die maximalen Kursabweichungen oder die subjektiven Beherrschbarkeitsurteile der Testpersonen normalverteilt sind. Die Stichproben zeigen einen grundsätzlichen Trend zur Normalverteilung, dieser wird jedoch durch Ausreißer der Kursabweichung und durch geringe Spannbreiten der Subjektivbeurteilung bei niedrigen Störaufschaltungen abgeschwächt. Bei der Anwendung von parameterbasierten Verfahren (z.B. von Vertrauensbereichen für das Kurshaltevermögen) sind für einzelne Verteilungen somit statistische Unschärfen in den abgeleiteten Aussagen zu erwarten, die durch ein geeignetes Zusatzkriterium unterstützt werden müssen, um belastbare Erkenntnisse abzuleiten. Für den Nachweis einer geforderten Wahrscheinlichkeit der Beherrschbarkeit einer Störaufschaltung durch Normalfahrer wird zur späteren Ableitung von Akzeptanzgrenzen in Kapitel 6 zusätzlich ein Binomialansatz auf Basis der aufgetretenen Pylonenkontakte gewählt. Die Anwendung der Korrelations- und Regressionsanalysen zur Bestimmung des Zusammenhangs zwi-

schen der objektiven und subjektiven Beherrschbarkeit mit den objektiven Bewegungskenngrößen ist hingegen nicht parameterbasiert und kann daher auch ohne Vorliegen einer Normalverteilung der Beobachtungsgrößen erfolgen.

4.5 Fazit

Die Durchführung der beiden Studien auf einem realen Testgelände und an einem dynamischen Fahrsimulator zur Bewertung des Fahrzeugverhaltens in Brems- und Ausweichtests kann entsprechend den Konzeptvorgaben erfolgen. Das Testgelände bietet die benötigten Platzverhältnisse, um die jeweiligen Fahrgassen so zu platzieren, dass die geforderten Anfahrgeschwindigkeiten reproduzierbar erzielt werden. Die unterschiedlichen Probandenkollektive aus jeweils ca. 100 Fahrern sind vergleichbar zusammengesetzt und an die Verteilung der Führerscheinbesitze in Deutschland angelehnt. Insgesamt werden 51 verschiedene Gierstörungsvarianten von jeweils mindestens 29 Fahrern absolviert und bewertet. In 128 Einzelfahrten der Realstudie und 53 Einzelfahrten am Fahrsimulator werden Fahrstreifenverletzungen mit Pylonen-Unfällen verzeichnet. In den Bremsmanövern kann der tatsächliche Kursverlauf infolge einer Gierstörung in Geradeaus- und Kurvenbremsung durch die Verwendung eines Differential-GPS mit einer Genauigkeit von ca. 4 cm in Bezug auf die vorhandenen Fahrstreifenbegrenzungen ermittelt werden. Als Referenzpunkte für den Kursverlauf werden die Reifenaußenkanten aller vier Räder des Testfahrzeugs gewählt.

Aus den durchgeführten Testfahrten können die benötigten Kennwerte für die Auswertung der objektiven Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens abgeleitet werden. In den durchgeführten Bremsmanövern werden als objektive Kennwerte neben den Unfallereignissen mit begrenzenden Pylonen die maximal auftretenden seitlichen Kursabweichungen und die minimalen Seitenabstände zur Fahrstreifenbegrenzung während der Stabilisierungsphase verwendet. In Ausweichtests werden hingegen nur die konkreten Unfallereignisse mit den begrenzenden Pylonen ausgewertet, da keine eindeutige Referenztrajektorie existiert. Zur Auswertung der objektiven und subjektiven Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens in Abhängigkeit der charakteristischen Bewegungskenngrößen werden Korrelations- und Regressionsanalysen angewandt. Diese Verfahren können auch für nicht normalverteilte Stichproben angewandt werden. Die Prüfung der Normalverteilungshypothese der Beobachtungsgrößen zeigt, dass eine Normalverteilung der Beobachtungsgrößen nicht in allen der 51 Testvarianten angenommen werden kann. Hierdurch ergeben sich Einschränkungen bei der Anwendung von parameterbasierten Verfahren (Konfidenzintervalle und Vergleiche von Mittelwerten). Die Ursache sind auftretende „Ausreißer“ in der Kursabweichung von einzelnen Testpersonen und die erwartungsgemäß geringen Varianzen der klassifizierten Subjektivurteile bei niedrigen Störausprägungen.

5 Ergebnisse

Die aufgezeichneten Daten der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit der durchgeführten Real- und Fahrsimulatorstudie werden verwendet, um das objektive Kurshaltevermögen in Abhängigkeit der geeigneten Bewegungskenngrößen zu quantifizieren und die aufgestellten Hypothesen zu prüfen. Im Vorfeld der Beschreibung konkreter Modellabhängigkeiten durch Regressionsansätze wird in Korrelationsanalysen ermittelt, welche der bekannten charakteristischen Bewegungskenngrößen - wie z.B. die maximale Giergeschwindigkeitsabweichung in Bremsmanövern $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ oder der maximale Hinterachs-Schwimmwinkel $\beta_{HA,\max}$ in Ausweichtests - am besten dazu geeignet sind, die resultierende objektive und subjektive Beherrschbarkeit zu erklären.

5.1 Korrelationen der untersuchten Kenngrößen

5.1.1 Bremsmanöver (80-180 km/h)

Tabelle 5.1 Korrelation der charakteristischen Open-Loop-Bewegungskenngrößen mit der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit im Closed-Loop

Kennwert	Korrelationskoeffizient " R_p " (Pearson)																	
	Subj. Beherrschbarkeit						Max. Kursabweichung						Min. Fahrstreifenabstand**					
	Realstudie			Simulator			Realstudie			Simulator			Realstudie			Simulator		
Open-Loop	K80	80	120	120	120*	180	K80	80	120	120	120*	180	K80	80	120	120	120*	180
$\Delta\dot{\psi}_{\max}$	0,70	0,73	0,72	0,69	0,69	0,69	0,29	0,55	0,49	0,63	0,73	0,68	0,21	0,40	0,41	0,57	0,63	0,65
$\Delta\dot{\psi}_{1s}$	0,55	0,69	0,64	0,69	0,70	0,69	0,34	0,55	0,48	0,63	0,72	0,66	0,24	0,41	0,40	0,56	0,61	0,63
$\Delta\dot{\psi}_{ref,\max}$	0,70	-	-	-	-	-	0,29	-	-	-	-	-	0,22	-	-	-	-	-
$\Delta\dot{\psi}_{ref,1s}$	0,57	-	-	-	-	-	0,34	-	-	-	-	-	0,24	-	-	-	-	-
$\Delta a_{y,\max}$	0,68	0,73	0,73	0,69	0,70	0,69	0,27	0,54	0,49	0,63	0,73	0,68	0,19	0,39	0,41	0,57	0,63	0,65
$\Delta a_{y,1s}$	0,61	0,69	0,68	0,68	0,70	0,70	0,33	0,56	0,49	0,64	0,72	0,69	0,29	0,41	0,42	0,57	0,62	0,66
$\beta_{HA,\max}$	0,68	0,73	0,70	0,69	0,69	0,70	0,32	0,56	0,49	0,63	0,73	0,69	0,25	0,40	0,41	0,57	0,63	0,66
$\beta_{SP,\max}$	0,68	0,73	0,70	0,69	0,69	0,70	0,31	0,56	0,49	0,63	0,73	0,69	0,25	0,40	0,41	0,57	0,63	0,66
δ_h	0,70	0,73	0,71	0,69	0,69	0,69	0,31	0,57	0,49	0,63	0,73	0,69	0,25	0,41	0,42	0,57	0,63	0,66
n:	284	290	291	260	259	264	237	239	242	260	259	264	237	239	242	260	259	264
Signifikanzniveau beidseitig jeweils < 0,01; K: Kurvenbremsung; Übrige: Geradeausbremsung; *: Erhöhter Stellgradient (207s); **: R_p = negativ																		
Markierte Felder: Jeweils stärkste Korrelation																		

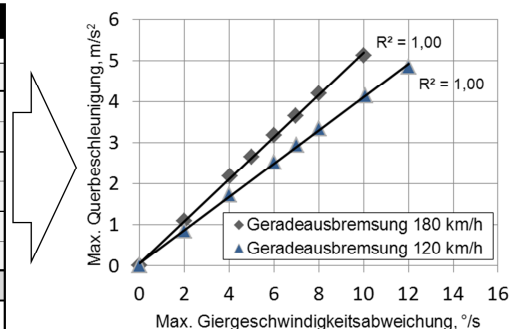
Tabelle 5.1 zeigt die Übersicht der ermittelten Korrelationskoeffizienten R_p der Bewegungskennwerte mit den gewählten Beurteilungskriterien in den durchgeführten Bremsmanövern. Alle aufgeführten Korrelationszusammenhänge beinhalten ein Signifikanzniveau von $\alpha_s < 0,01$ und sind somit hochsignifikant. Aufgrund des nahezu funktionalen Zusammenhangs der Bewegungskenngrößen untereinander in den Geradeausbremsungen ($R_p \approx 1$), siehe Geradeausbremsung aus 180 km/h in Tabelle 5.2, kann keine eindeutige Aussage getroffen werden, welcher Kennwert der Bewegungsgrößen $\dot{\psi}$, a_y oder $\beta_{SP/HA}$ die objektive und subjektive Beherrschbarkeit in Geradeausbremsung am besten erklärt. Der funktionale Zusammenhang zwischen zahlreichen „gleichwertigen“

Bewegungskenngrößen wird auch von Rompe et al. genannt.⁴²⁸ In Kurvenbremsung aus 80 km/h (Spalten „K80“ in Tabelle 5.1) erscheinen die Maximalwerte der Giergeschwindigkeitsabweichung im Vergleich zu den häufig postulierten Ein-Sekunden-Werten hingegen deutlich besser geeignet, die subjektive Beherrschbarkeit der Testpersonen zu erklären ($R_{P,\Delta\dot{\psi}_{\max}/\Delta\dot{\psi}_{ref,\max}}=0,7$ im Vergleich zu $R_{P,\Delta\dot{\psi}_{1s}/\Delta\dot{\psi}_{ref,1s}}=0,55/0,57$). Dies gilt ebenfalls für den Zusammenhang der Bewegungskenngrößen mit der benötigten Lenkarbeit. Das objektive Kurshaltevermögen (maximale Kursabweichung und minimaler Begrenzungsabstand) korreliert in Kurvenbremsung wiederum stärker mit den Ein-Sekunden-Werten (z.B. $R_{P,\Delta a_{y,1s}}=0,29$ zu $R_{P,\Delta a_{y,\max}}=0,19$). Die Korrelationszusammenhänge mit dem objektiven Kurshaltevermögen sind in Kurvenbremsung im Vergleich zu den Geradeausbremsungen jedoch deutlich schwächer ausgeprägt ($\Delta R_{P,i}=0,2-0,4$). Die Ursache liegt in der im Vergleich zur Geradeausfahrt unpräziseren Kursführung der Testpersonen in Kurvenfahrt auch in ungestörter Fahrt, siehe Kapitel 5.2. Die Stellvariante δ_h weist aufgrund des funktionalen Zusammenhangs mit den Bewegungskenngrößen erwartungsgemäß ebenfalls eine durchgängig hochsignifikante Korrelation mit den gewählten Beobachtungsgrößen auf.

In Summe zeigen insbesondere die maximale Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ (bzw. die auf die Fahrgeschwindigkeit bezogene Abweichung zur Referenz-Giergeschwindigkeit $\Delta\dot{\psi}_{ref,\max}$ in Kurvenbremsung) und die maximale Querbeschleunigungsabweichung $\Delta a_{y,\max}$ eine durchgängig gute Eignung zur Erklärung der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit. In dieser Arbeit wird aufgrund der mehrheitlichen Verwendung der Giergeschwindigkeitsabweichung zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens in der Literatur eine Auswertung der Beherrschbarkeit über der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung (Gierstörung) gewählt.

Tabelle 5.2 Nachweis des funktionalen Zusammenhangs zwischen den charakteristischen Open-Loop-Bewegungskenngrößen in Geradeausbremsung aus 180 km/h am Fahrsimulator

Kennwert	Korrelationskoeffizient "R _P " (Pearson)						
Open-Loop	Geradeausbremsung aus 180 km/h						
Open-Loop	$\Delta\dot{\psi}_{\max}$	$\Delta\dot{\psi}_{1s}$	$\Delta a_{y,\max}$	$\Delta a_{y,1s}$	$\beta_{HA,\max}$	$\beta_{SP,\max}$	δ_h
$\Delta\dot{\psi}_{\max}$	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\Delta\dot{\psi}_{1s}$	0,99	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99
$\Delta a_{y,\max}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\Delta a_{y,1s}$	1,00	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
$\beta_{HA,\max}$	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\beta_{SP,\max}$	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
δ_h	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$R_P = 1$: "funktionaler Zusammenhang"							



⁴²⁸ Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen, S. 12f

5.1.2 Ausweichtest (80 km/h)

Tabelle 5.3 Korrelation der charakteristischen Open-Loop-Bewegungskenngrößen mit der subjektiven Beherrschbarkeit im Ausweichtest

Kennwert Kenngröße	Korrelationskoeffizient " R_p " (Pearson)							
	Bewertungskriterium		Kenngröße					
	Subj. Beherrschbarkeit	Lenkarbeit	$\beta_{HA,max}$	$\beta_{SP,max}$	α_h	ψ_{max}	$a_{y,max}$	k_{prop}
$\beta_{HA,max}$	0,54	0,67	1,00	0,99	0,93	0,80	0,82	0,49
$\beta_{SP,max}$	0,55	0,67	0,99	1,00	0,91	0,83	0,81	0,49
α_h	0,43	0,77	0,93	0,91	1,00	0,80	0,84	0,13**
ψ_{max}	0,47	0,77	0,80	0,83	0,80	1,00	0,78	0,26
$a_{y,max}$	0,39	0,69	0,82	0,81	0,84	0,78	1,00	0,20*
k_{prop}	0,40	-0,01**	0,49	0,49	0,13**	0,26	0,20*	1,00

Signifikanzniveau: < 0,01; Abweichungen: *: < 0,05; **: kein signifikanter Zusammenhang

Im Ausweichtest aus 80 km/h besteht zwischen den im Closed-Loop-Modus ermittelten Bewegungskenngrößen untereinander im Gegensatz zu den diskutierten Open-Loop-Kenngrößen in Geradeausbremsung kein funktionaler Zusammenhang, siehe Tabelle 5.3. Somit werden unterschiedliche Korrelationszusammenhänge mit der subjektiven Beherrschbarkeit und dem Lenkaufwand deutlich: Die maximalen Schwimmwinkel im Schwerpunkt oder an der Hinterachse $\beta_{max,SP/HA}$ zeigen hierbei die beste Eignung zur Erklärung der subjektiven Beherrschbarkeit ($R_{p,\beta_{max,HA/SP}} = 0,55/0,54$). Dieser Zusammenhang ist deutlich stärker ausgeprägt als die korrelativen Zusammenhänge des Mitlenkfaktors k_{prop} , der maximalen Querbeschleunigung $a_{y,max}$ oder des anhand eines Einspurmodells berechneten Schräglaufwinkels an der Hinterachse $\alpha_h = \beta_{HA} - \delta_{HA}$ ($R_{p,k_{prop}} = 0,4$; $R_{p,a_{y,max}} = 0,39$, $R_{p,\alpha_h} = 0,43$). Die resultierende Lenkarbeit, definiert als das Integral der Lenkradgeschwindigkeit (im Betrag) zwischen Ein- und Ausfahrgasse, korreliert am besten mit der maximalen Gierrate und dem maximalen Schräglaufwinkel an der Hinterachse ($R_{p,\psi_{max}} = R_{p,\alpha_h} = 0,77$). Der Kausalzusammenhang ist hierbei jedoch nicht eindeutig zu klären, da eine beidseitige Abhängigkeit zwischen der Lenktätigkeit des Fahrers und der Stabilität des Fahrzustandes besteht. Fahrer, die während des Ausweichvorgangs hohe Lenkwinkel aufbringen, können hierdurch entweder verstärkte Fahrzeugreaktionen verursachen oder den Fahrzustand stabilisieren. Der nicht nachweisbare Zusammenhang zwischen dem Mitlenkfaktor k_{prop} und der Lenkarbeit ($R_p \approx 0$) könnte dafür sprechen, dass die Testpersonen ihr individuelles Lenkmuster unabhängig von der Variation des Fahrzeugverhaltens beibehalten, siehe auch Keen⁴²⁹, und die Intensität der Fahrzeugreaktion somit vor allem von der Intensität der Lenkeingaben bzw. des Lenkaufwandes abhängt. Andererseits erscheint auch eine Kompensation des bei einem Mitlenken der Hinterachse prinzipiell reduzierten Lenkradwinkelbedarfs durch einen

anschließenden höheren Korrekturbedarf des destabilisierten Fahrverhaltens möglich. Zur Beschreibung der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit in Kapitel 5.5 wird bevorzugt der maximale Hinterachs-Schwimmwinkel gewählt, da im Vergleich zum erzielten Schwimmwinkel im Fahrzeug-Schwerpunkt ein direkterer Zusammenhang zum Schräglaufwinkel der Räder an der Hinterachse und somit zum Fahrzustand besteht.

5.2 Objektive Beherrschbarkeit von Bremsmanövern

Zur Bewertung der objektiven Beherrschbarkeit werden die beiden Kriterien

- maximale Kursabweichung $\Delta y_{\max,4s}$
- und minimaler Begrenzungsabstand von der Fahrstreifenbegrenzung $\Delta y_{\text{ref},\min,4s}$

der Reifenaußenkanten der Räder innerhalb von vier Sekunden nach Bremsbeginn bzw. Aufschaltung des HA-Lenkswinkels verwendet und über der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung (maximale Gierstörung) aufgetragen. Die erzielten Maximal- und Minimalwerte der Testpersonen werden überwiegend innerhalb von zwei Sekunden und in wenigen Fällen erst innerhalb von vier Sekunden nach Störaufschaltung erzielt, was den Erkenntnissen von Wallentowitz et al. bei der Untersuchung von Lenksystemeingriffen an der Vorderachse entspricht.⁴³⁰

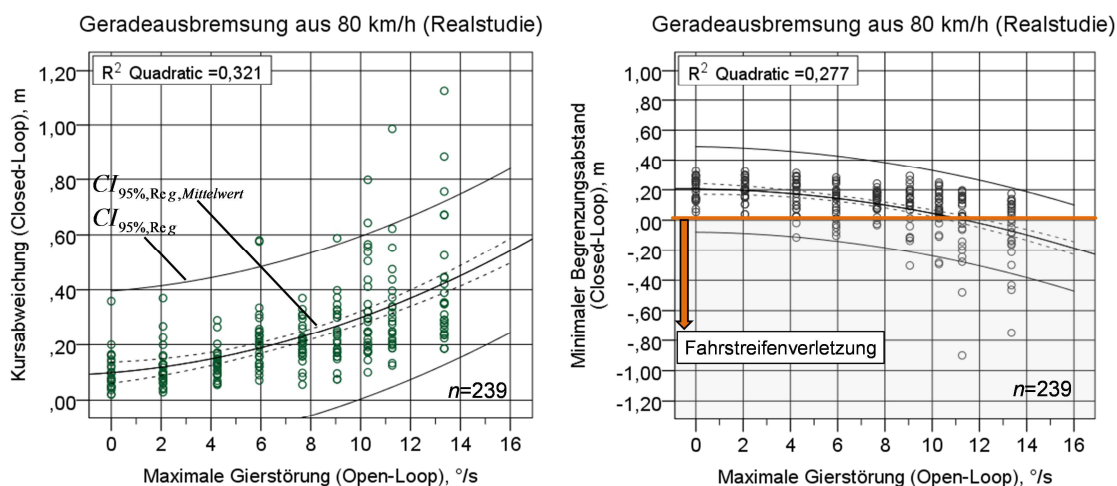


Bild 5.1 Maximale Kursabweichungen und minimale Begrenzungsabstände der Testpersonen in Abhängigkeit der Open-Loop-Maximalwerte der Gierstörungen in Geradeausbremsung aus 80 km/h

Bild 5.1 zeigt die vollständige Verteilung der maximalen Kursabweichungen (links) und der minimalen Begrenzungsabstände (rechts) im Closed-Loop am Beispiel der Geradeausbremsung aus 80 km/h über den neun Varianten der maximalen Open-Loop-

⁴²⁹ Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, S. 231ff

⁴³⁰ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

Gierstörung. Ein Unterschreiten des Begrenzungsabstandes von 0 m stellt hierbei eine „Fahrstreifenverletzung“ mit potentielltem Pylonenkontakt dar. Die Regressionslinien verdeutlichen einen progressiven Anstieg der mittleren maximalen Kursabweichung und eine entsprechend progressive Abnahme des mittleren minimalen Begrenzungsabstandes. Ebenso werden speziell bei hohen Gierstörungen die durchgängig in allen Bremsmanövern beobachteten „Ausreißer“ in der Kursabweichung und des Begrenzungsabstandes deutlich. Die Verteilung der Kursabweichungen und der Begrenzungsabstände ist zudem heteroskedastisch. Eine heteroskedastische Verteilung liegt vor, wenn die Varianzen der Beobachtungsgrößen der einzelnen Verteilungen untereinander nicht identisch sind.⁴³¹ Die Varianzen der Kursabweichungen und der Begrenzungsabstände nehmen in den Bremsmanövern – wie in Bild 5.1 deutlich wird – bei hohen Gierstörungsvarianten zu und weichen signifikant voneinander ab. Die in Bild 5.1 skizzierten Vertrauensbereiche für den Verlauf der Regression $CI_{95\%, Re g, Mittelwert}$ und die Vertrauensbereiche (Erwartungswerte) für eine Einzelstichprobe $CI_{95\%, Re g}$ setzen jedoch die Annahme einer Homoskedastizität, also einer konstanten Varianz, voraus. Somit können mit diesem Verfahren keine zuverlässigen Vorhersagen oder Vergleiche der objektiven Beherrschbarkeit für eine einzelne Gierstörungsvariante vorgenommen werden. In den folgenden Auswertungen wird daher die Betrachtung der Regressionskurven der einzelnen Mittelwerte und ihrer individuellen Vertrauensbereiche (95 %-Niveau) für einen Vergleich der Gierstörungsvarianten in den verschiedenen Bremsmanövern gewählt.

5.2.1 Geradeaus- und Kurvenbremsung aus 80-120 km/h (Realstudie)

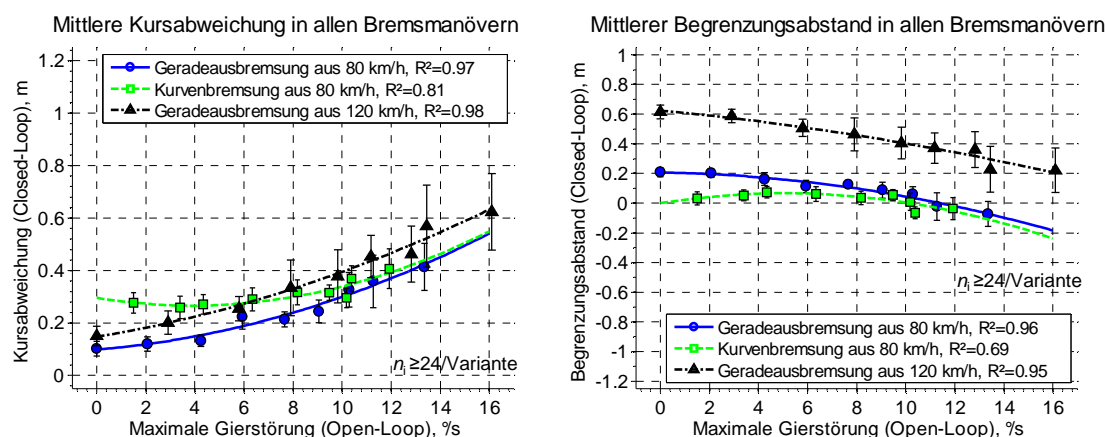


Bild 5.2 Mittelwerte der maximalen Kursabweichung und des minimalen Begrenzungsabstandes in den Bremsmanövern der Realstudie in Abhängigkeit der Open-Loop-Maximalwerte der Gierstörungen

Die mittlere Kursabweichung $\Delta \bar{y}_{\max, 4,5}$ steigt sowohl in Geradeausbremsung aus 80 km/h als auch in Geradeausbremsung aus 120 km/h progressiv über dem Betrag der Open-

⁴³¹ Bortz et al. (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, S. 193

Loop-Gierstörung an, siehe Bild 5.2 (links). Dementsprechend fällt der mittlere Begrenzungsabstand $\Delta \bar{y}_{ref,min,4s}$ in den Geradeausbremsungen über der Gierstörung progressiv ab, siehe Bild 5.2 (rechts). In ungestörter Geradeausbremsung aus 80 km/h werden im Mittel 10 cm Kursabweichung erzielt, bei 13,3°/s ca. 42 cm. Die mittlere Kursabweichung bei erhöhter Ausgangsfahrgeschwindigkeit (120 km/h) ist im Vergleich zur Geradeausbremsung aus 80 km/h konstant zwischen ca. 5-10 cm erhöht. Eine Steigerung dieser annähernd konstanten Abweichung bei hohen Open-Loop-Gierstörungen kann nicht beobachtet werden. Der mittlere Begrenzungsabstand in Geradeausbremsung aus 80 km/h beträgt im ungestörten Fall 0,2 m und sinkt bei einer maximalen Gierstörung von 13,3°/s auf im Mittel ca. -7 cm ab, was einer Überschreitung der Fahrstreifenbegrenzung entspricht. In Geradeausbremsung aus 120 km/h beträgt die Fahrstreifenbreite 3,5 m statt 2,5 m, weshalb die mittleren Begrenzungsabstände im Vergleich zur Geradeausbremsung aus 80 km/h jeweils um ca. 40 cm höher ausfallen. Aus diesem Grund wird trotz der im Mittel um ca. 5-10 cm erhöhten Kursabweichung auch bei einer maximalen Gierstörung von 16,1°/s noch ein mittlerer Begrenzungsabstand von ca. 0,2 m erzielt. Die Abhängigkeit der mittleren maximalen Kursabweichung und des mittleren minimalen Begrenzungsabstands von der Open-Loop-Gierstörung kann über einen quadratischen Modellansatz mit $R^2 = 0,95 - 0,98$ annähernd auf dem Niveau eines funktionalen Zusammenhangs beschrieben werden.

Der Verlauf der mittleren Kursabweichung und des mittleren Begrenzungsabstands weichen in Kurvenbremsung aus 80 km/h hingegen deutlich von den beobachteten Zusammenhängen in Geradeausbremsung ab, siehe Bild 5.2: Bereits in ungestörter Kurvenbremsung ($\Delta \dot{\psi}_{ref,max} = 1,5^\circ/s$) tritt eine mittlere Kursabweichung von ca. 0,28 m auf. Der im Vergleich zur Geradeausfahrt erhöhte seitliche Platzbedarf von Testpersonen während einer Kurvenfahrt wurde bereits von Wallentowitz et al. beobachtet.⁴³² Bis ca. 10°/s Open-Loop-Gierstörung ist in Kurvenbremsung keine signifikante Erhöhung der mittleren Kursabweichung bzw. kein signifikanter Abfall des mittleren Begrenzungsabstandes nachweisbar. Ab ca. 10°/s Open-Loop-Gierstörung liegen die Mittelwerte der Kursabweichung und des Begrenzungsabstandes anschließend annähernd im Bereich der Kursabweichungen und Begrenzungsabstände in Geradeausbremsung aus ebenfalls 80 km/h.

Aufgrund des eingeschränkten Kurshaltevermögens der Normalfahrer in Kurvenfahrt werden bereits ohne zusätzliche Aufschaltung eines Hinterrad-Lenk winkels Fahrstreifenverletzungen beobachtet. Bild 5.3 zeigt die Übersicht der prozentualen Fahrstreifenverletzungen und Pylonenkontakte in den jeweiligen Gierstörungsvarianten der Gerade-

⁴³² Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

aus- und Kurvenbremsungen. Die Unterscheidung von Fahrstreifenverletzungen und Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten wird vorgenommen, da kurzzeitige Fahrstreifenverletzungen vor dem Auftreten eines Pylonenkontakts durch den Fahrer korrigiert werden können. Insbesondere bei Geradeaus- und Kurvenbremsung aus 80 km/h treten zahlreiche Fahrstreifenverletzungen ohne beobachtete Pylonenkontakte auf. In Geradeausbremsung aus 120 km/h ist dies hingegen nur in wenigen Einzelfahrten der Fall. Die Ursache der deutlichen Differenz zwischen dem Anteil der Fahrstreifenverletzungen und dem Anteil der Pylonenkontakte in den Bremsungen aus 80 km/h kann in der hohen Anzahl an Fahrstreifenverletzungen im Bereich weniger Zentimeter durch die enge Fahrgasse (2,5 m) und in dem bei 80 km/h größeren Zeitfenster für eine erfolgreiche Kurskorrektur vor der nächsten Pylone im Vergleich zu einer erhöhten Fahrgeschwindigkeit (Stellabstand = konstante 10 m) vermutet werden. Bei geringen Fahrstreifenverletzungen und geringen Kollisionsgeschwindigkeiten ist die Erkennbarkeit von Pylonenkontakten durch den Versuchsbeobachter zudem erschwert.

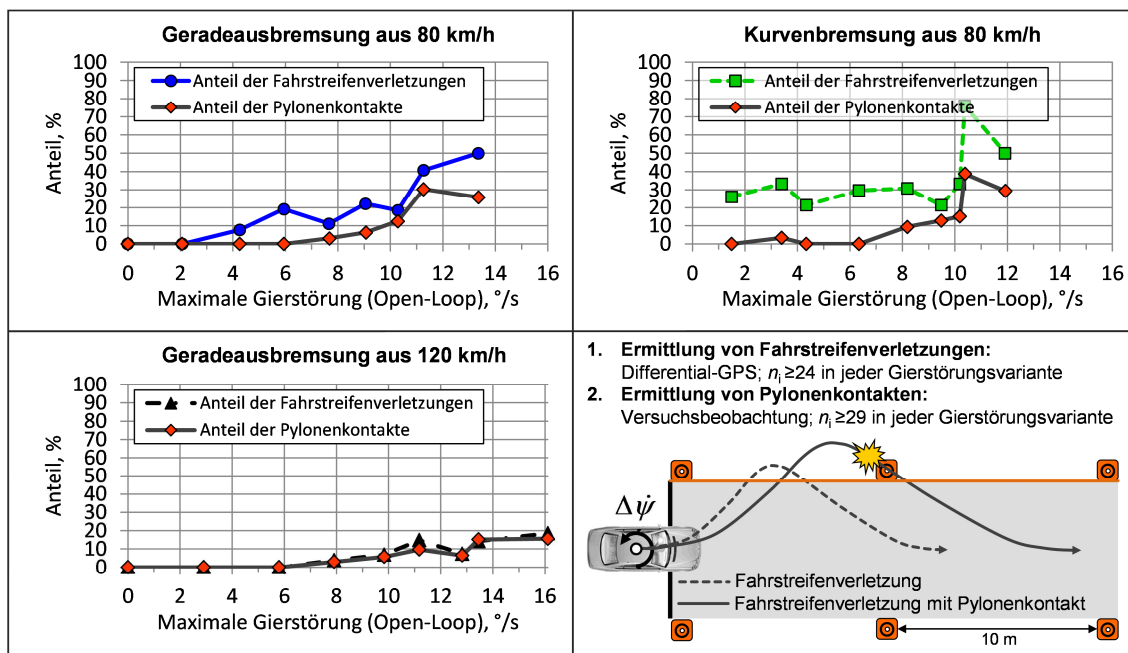


Bild 5.3 Übersicht der Fahrstreifenverletzungen und beobachteten Pylonenkontakte in Abhängigkeit der Open-Loop-Gierstörungen in den Bremsmanövern der Realstudie

In den Geradeausbremsungen aus 80 km/h treten erste Fahrstreifenverletzungen bei 4,3°/s Open-Loop-Gierstörung auf, während erste Pylonenkontakte erst bei 7,7°/s beobachtet werden. Bei 13,3°/s Open-Loop-Gierstörung verlassen 50 % der Testpersonen den Fahrstreifen und in 26 % der Fälle, also etwa zur Hälfte, kollidieren sie nachweislich mit einer Pylone. Bei erhöhter Fahrgeschwindigkeit werden bis 6°/s Open-Loop-Gierstörung überhaupt keine Fahrstreifenverletzungen verzeichnet. Die Anteile bei der maximalen Störausprägung von 16,1°/s liegen in Geradeausbremsung aus 120 km/h im

Vergleich zur Geradeausbremsung aus 80 km/h aufgrund des breiteren Fahrstreifens (3,5 m) bei nur ca. 19 % Fahrstreifenverletzungen und ca. 16 % Pylonenkontakte. In Kurvenbremsung werden beginnend mit der ungestörten Kurvenbremsung bis hin zu ca. 10°/s Open-Loop-Gierstörung durchgängig ca. 20-30 % Fahrstreifenverletzungen registriert. Bei 3,4°/s Open-Loop-Gierstörung resultiert hieraus ein erster beobachteter Pylonenkontakt. Ein weiterer Pylonenkontakt wird erst bei einer Gierstörung von 8,2°/s verzeichnet.

5.2.2 Störaufschaltung ohne gleichzeitige Bremsbetätigung bei 80 km/h

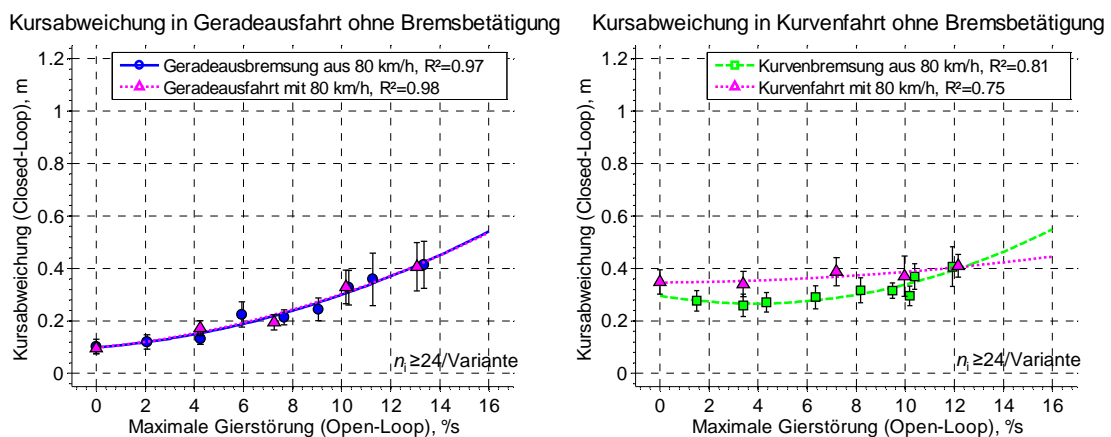


Bild 5.4 Objektives Kurshaltevermögen bei Störaufschaltung der HA-Lenkwinkel ohne gleichzeitige Fahrerbremsung in Geradeaus- und Kurvenfahrt mit 80 km/h

In den durchgeführten Bremsmanövern wird die Hinterachs-Störaufschaltung an die Bremsbetätigung des Fahrers gekoppelt, um die benötigte Variation des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern darstellen zu können. In bisherigen Studien zur Störbeurteilung von Lenksystemeingriffen werden die Störungen hingegen in freier Geradeaus- und Kurvenfahrt aufgeschaltet. Bild 5.4 vergleicht die resultierenden Mittelwerte der maximalen Kursabweichungen infolge einer unerwarteten Aufschaltung der Hinterachs-Lenkeingriffe mit den resultierenden Kursabweichungen bei Kopplung der Störaufschaltungen an eine Bremsbetätigung. Bei einer unerwarteten Störaufschaltung in Geradeausfahrt mit 80 km/h kann nach Bild 5.4 (links) kein Einfluss der Methodik der Störaufschaltung auf das resultierende Kurshaltevermögen festgestellt werden. Die Regressionskurven (quadratischer Modellansatz) von Geradeausfahrt und Geradeausbremsung verlaufen nahezu deckungsgleich und auch die einzelnen Mittelwerte können bei ähnlichen Open-Loop-Gierstörungen als identisch eingestuft werden (z.B. bei ca. 2°/s, ca. 7-8°/s und ca. 13°/s). Die ermittelte Beherrschbarkeit in Geradeausbremsungen ist also auf die Beherrschbarkeit von zufälligen Störaufschaltungen direkt übertragbar.

Zufällige Störaufschaltungen führen in Kurvenfahrt im Bereich zwischen ca. 1,5°/s und 10°/s hingegen zu einer um ca. 7-10 cm erhöhten Kursabweichung. Bei ca. 12°/s Open-

Loop-Gierstörung sind die erzielten mittleren Kursabweichungen wiederum vergleichbar. Da bereits in ungestörter Kurvenfahrt mit ca. 35 cm eine signifikant höhere mittlere Kursabweichung im Vergleich zur Kurvenbremsung ohne zusätzliche Störaufschaltung erzielt wird (nur ca. 28 cm), ist die Ursache jedoch nicht alleine in der zufälligen Aufschaltung der Gierstörungen zu sehen. Vielmehr kann vermutet werden, dass die Reduzierung der Fahrgeschwindigkeit infolge der Bremsbetätigung zu einer verbesserten Kurshaltung durch die Normalfahrer beiträgt.

5.2.3 Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrsimulator)

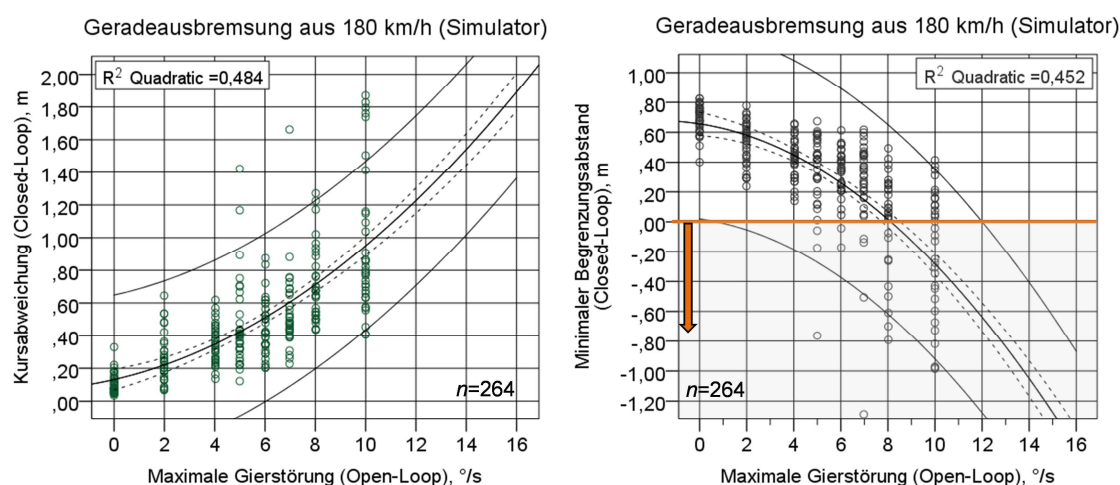


Bild 5.5 Objektives Kurshaltevermögen der Testpersonen in Geradeausbremsung aus 180 km/h am Fahrsimulator

Die Verteilungen der maximalen Kursabweichungen und der minimalen Begrenzungsabstände in den Geradeausbremsungen aus 180 km/h am Fahrsimulator zeigen eine mit der Realstudie vergleichbare Verteilungscharakteristik, siehe Bild 5.5: Es werden signifikant ansteigende bzw. voneinander abweichende Varianzen der Beobachtungsgrößen über dem Betrag der maximalen Gierstörung erzielt (heteroskedastische Verteilung). Ebenfalls tritt eine über dem Betrag der Open-Loop-Gierstörung ansteigende Anzahl von Fahrstreifenverletzungen auf, die eine spätere Beurteilung der objektiven Beherrschbarkeit hinsichtlich von Akzeptanzgrenzen in Kapitel 6.1 ermöglicht.

Bild 5.6 vergleicht die objektive Beherrschbarkeit der bereits diskutierten Geradeausbremsungen aus 120 km/h (Realstudie) mit den drei am Fahrsimulator durchgeführten Bremsmanövertypen:

- 120 km/h und zur Realstudie identischer HA-Stellgradient ($\dot{\delta}_h = 4^\circ/\text{s}$)
- 120 km/h und ein erhöhter Stellgradient ($\dot{\delta}_h = 20^\circ/\text{s}$) zur Prüfung des Einflusses eines variierten Zeitpunkts der erzielten Open-Loop-Gierstörungsmaxima

- 180 km/h und identische Zeitpunkte der Open-Loop-Gierstörungsmaxima im Vergleich zur Realstudie ($\dot{\delta}_h = \text{ca. } 3^\circ/\text{s}$).

In den Geradeausbremsungen aus 120 km/h mit identischem HA-Stellgradienten ($4^\circ/\text{s}$) werden am Fahrsimulator im Vergleich zu den Ergebnissen der Realstudie ab ca. $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 6^\circ/\text{s}$ Open-Loop-Gierstörung deutlich erhöhte Mittelwerte der Kursabweichung $\Delta\bar{y}_{\max,4s}$ und deutlich reduzierte mittlere Begrenzungsabstände $\Delta\bar{y}_{\text{ref},\min 4s}$ bei vergleichbaren Open-Loop-Gierstörungen beobachtet, siehe Bild 5.6 (links). Die mittleren Kursabweichungen sind am Fahrsimulator ab $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 6^\circ/\text{s}$ um mehr als 50 % erhöht und die mittlere Kursabweichung bei maximaler Störausprägung von $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 16,1^\circ/\text{s}$ (Realstudie) wird in der Fahrsimulatorstudie bereits bei ca. $10^\circ/\text{s}$ Open-Loop-Gierstörung erzielt bzw. übertroffen.

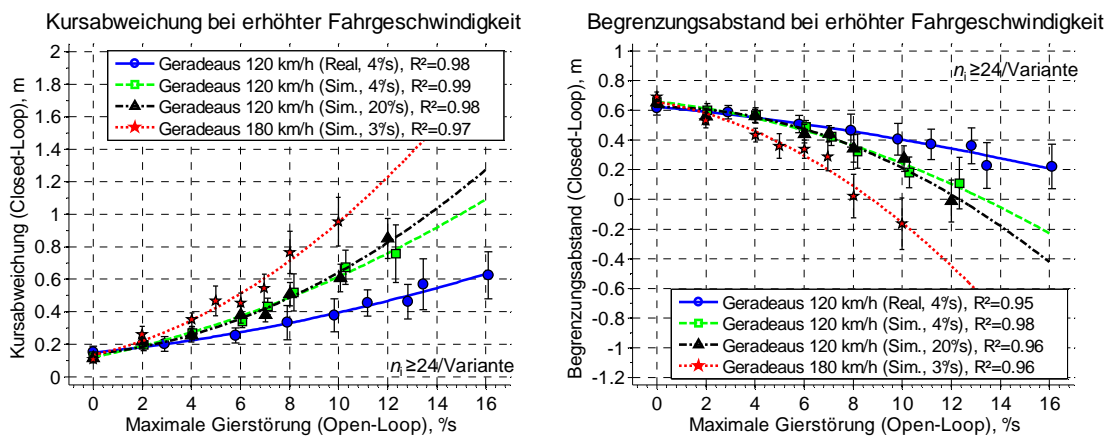


Bild 5.6 Vergleich der mittleren Kursabweichung und der mittleren Begrenzungsabstände zwischen Realstudie (120 km/h) und Fahrsimulatorstudie (120-180 km/h) in Abhängigkeit der maximalen Gierstörung

Auch der Vergleich der mittleren Begrenzungsabstände zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie aus Bild 5.6 (rechts) belegt ab $6^\circ/\text{s}$ Gierstörung zur mittleren Kursabweichung identische Differenzen zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie. Das erzielte Kurshaltevermögen der Normalfahrer in der Fahrsimulatorstudie ist also nur eingeschränkt auf die Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens des realen Testfahrzeugs übertragbar. Die Ursache dieser signifikanten Abweichung kann an folgende mögliche Unterschiede zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie geknüpft sein:

- abweichende mittlere Fahrferigkeit des akquirierten Normalfahrerkollektivs
- verändertes Regelverhalten der Normalfahrer aufgrund der in Teilen virtuellen Umgebung (Umgebungsdarstellung, Akustik)
- verändertes Regelverhalten bzw. veränderte Blickführung aufgrund der Verwendung eines vorausfahrenden virtuellen Führungsfahrzeugs

- Abweichungen der Bewegungs- und Lenkmomentdarstellung am Hexapod-Simulator im Vergleich zur Realstudie (Bremsverzögerungen $a_{x,i}$ sind beispielsweise nur durch eine zusätzliche Nickbewegung darstellbar)

Der tatsächliche Kausalzusammenhang kann auf Basis der statistischen Auswertung nicht belegt werden. Dennoch können die Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie verwendet werden, um die Sensitivität der objektiven und subjektiven Beherrschbarkeit auf eine erhöhte Verstellgeschwindigkeit $\dot{\delta}_r$ und eine erhöhte Fahrgeschwindigkeit (180 km/h) zu prüfen, siehe ebenfalls Bild 5.6: Bei einer erhöhten Verstellgeschwindigkeit $\dot{\delta}_r$ und somit geringeren Zeitverzügen der maximalen Open-Loop-Gierstörungen kann demnach sowohl auf Basis der mittleren Kursabweichungen $\Delta\bar{y}_{\max,4s}$ (Bild 5.6, links) als auch auf Basis der minimalen Begrenzungsabstände $\Delta\bar{y}_{ref\min,4s}$ (Bild 5.6, rechts) keine signifikante Differenz der objektiven Beherrschbarkeit nachgewiesen werden. Die objektive Beherrschbarkeit scheint also nur vom Betrag der Gierbewegungsstörung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$, nicht aber vom Zeitverzug der maximalen Störausprägung $t_{\dot{\psi}_{\max}}$ abhängig zu sein.

Im Gegensatz hierzu ist das objektive Kurshaltevermögen bei Geradeausbremsung aus 180 km/h im Vergleich zu einer Ausgangsfahrgeschwindigkeit von 120 km/h bereits ab geringen Open-Loop-Gierstörungen von $2^\circ/\text{s}$ statistisch signifikant und im Betrag deutlich vermindert. Die erzielten Mittelwerte der maximalen Kursabweichungen $\Delta\bar{y}_{\max,4s}$ in Geradeausbremsung aus 180 km/h liegen bei identischen Gierstörungen zwischen im Minimum 26,2 % ($\Delta\dot{\psi}_{\max} = 7^\circ/\text{s}$) und im Maximum 47,5 % ($\Delta\dot{\psi}_{\max} = 8^\circ/\text{s}$) oberhalb der mittleren Kursabweichungen in Geradeausbremsung aus 120 km/h. In den Bremsmanövern mit jeweils identischer Open-Loop-Gierstörung wird ab $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 2^\circ/\text{s}$ eine mittlere Differenz von

$$\bar{\Delta}(\Delta\bar{y}_{\max,4s}) = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{\Delta\bar{y}_{\max,180\text{km/h},i} - \Delta\bar{y}_{\max,120\text{km/h},i}}{\Delta\bar{y}_{\max,120\text{km/h},i}}}{6} = 35,5\% \quad (5.1)$$

beobachtet. Die absolute Differenz der mittleren Begrenzungsabstände $\Delta\bar{y}_{ref,\min,4s}$ nimmt über dem Betrag der Open-Loop-Gierstörungen tendenziell zu und beträgt bei $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 10^\circ/\text{s}$ nach Bild 5.6 (rechts) ca. 0,4 m. Zudem wird in Geradeausbremsung aus 180 km/h bereits bei einer Open-Loop-Gierstörung von $10^\circ/\text{s}$ ein negativer mittlerer Begrenzungsabstand von -0,2 m erzielt.

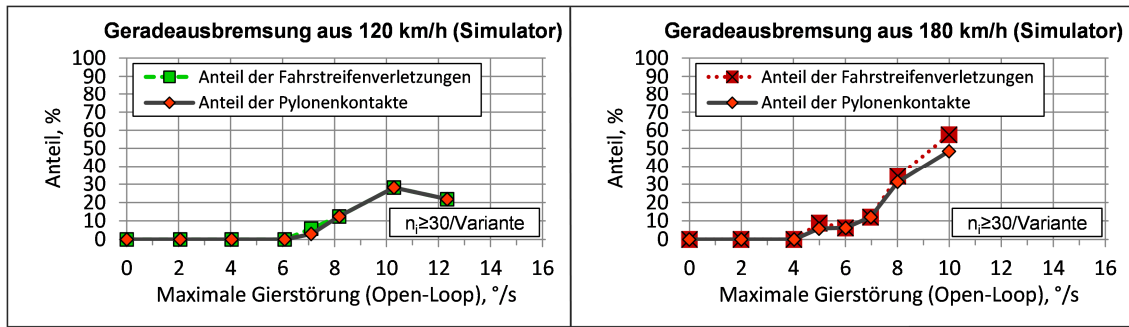


Bild 5.7 Übersicht der Fahrstreifenverletzungen und beobachteten Pylonenkontakte in Abhängigkeit der Open-Loop-Gierstörungen in Geradeausbremsung am Fahrsimulator

Als Konsequenz treten in Geradeausbremsung aus 180 km/h nach Bild 5.7 (rechts) bereits ab $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 5^\circ/\text{s}$ Open-Loop-Gierstörung Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten auf. Bei $10^\circ/\text{s}$ Open-Loop-Gierstörung verlassen schließlich 58 % der Normalfahrer den Fahrstreifen und fast alle (48 %) touchieren dabei mindestens eine Pylone. In Geradeausbremsung aus 120 km/h ist das Kurshaltevermögen einzelner Normalfahrer erst bei $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 7^\circ/\text{s}$ erschöpft und der Anteil der Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten beträgt bei $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 10^\circ/\text{s}$ nur 28 %.

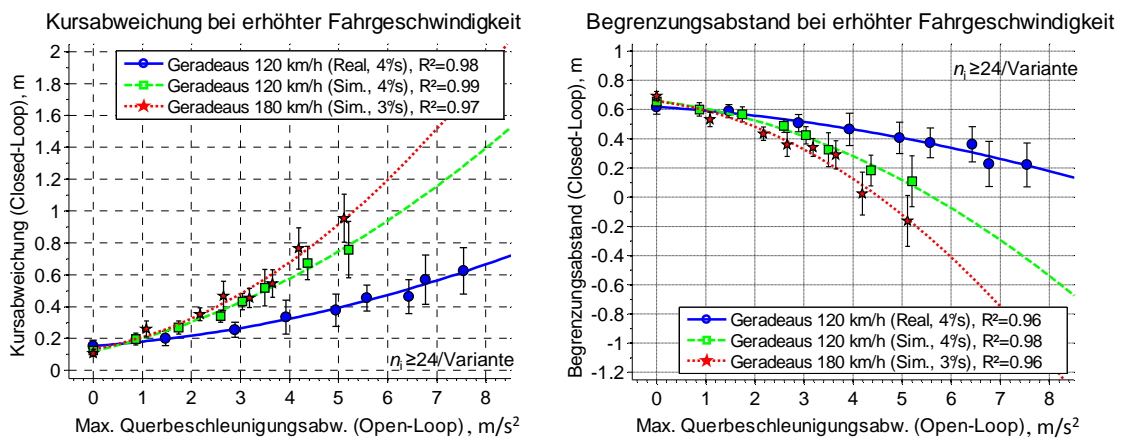


Bild 5.8 Mittlere Kursabweichung und mittlere Begrenzungsabstände in Abhängigkeit der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung

In Bild 5.8 wird die objektive Beherrschbarkeit von Hinterachs-Störaufschaltungen durch Normalfahrer über der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung $\Delta a_{y,\max}$ dargestellt (im Gegensatz zu der bisherigen Darstellung über $\Delta\dot{\psi}_{\max}$). Auch anhand von $\Delta a_{y,\max}$ können die bisher diskutierten Abhängigkeiten der Beobachtungsgrößen von der Störausprägung erwartungsgemäß durch quadratische Regressionskurven beschrieben werden. Der progressive Anstieg der Kursabweichung bzw. der progressive Abfall der Begrenzungsabstände wird auch über der maximalen Querbeschleunigungsabweichung $\Delta a_{y,\max}$ deutlich. Ebenfalls bleiben die Abweichungen der Beobachtungs-

größen zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie nach Bild 5.6 und Bild 5.8 bestehen. Keiner der betrachteten Open-Loop-Kennwerte kann also die Abweichung zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie erklären. Der Einfluss einer erhöhten Ausgangsfahrgeschwindigkeit (180 km/h im Vergleich zu 120 km/h) auf die mittlere Kursabweichung und den mittleren Begrenzungsabstand ist hingegen bei Verwendung der maximalen Querbeschleunigungsabweichung $\Delta a_{y,\max}$ als charakteristischem Bewegungskennwert reduziert: Bei Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichungen zwischen $\Delta a_{y,\max} = 3\text{--}3,5 \text{ m/s}^2$ kann keine signifikante Differenz der Mittelwerte der beiden Einzelverteilungen von Kursabweichung und Begrenzungsabstand nachgewiesen werden. Erst ab $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 4 \text{ m/s}^2$ werden wiederum deutliche, aber weiterhin im Vergleich zur Darstellung über der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta \dot{\psi}_{\max}$ (Gierstörung) geringere Abweichungen beobachtet.

5.3 Subjektive Beherrschbarkeit von Bremsmanövern

Als Ergänzung der vorgestellten objektiven Beherrschbarkeit von Gierstörungen bzw. von HA-Störaufschaltungen wird in diesem Abschnitt die subjektive Beurteilung der Beherrschbarkeit durch Normalfahrer diskutiert. Hierdurch wird eine Gegenüberstellung mit der objektiven Beherrschbarkeit sowie ein Vergleich mit bisherigen Studien ermöglicht.

5.3.1 Geradeaus- und Kurvenbremsung aus 80-120 km/h (Realstudie)

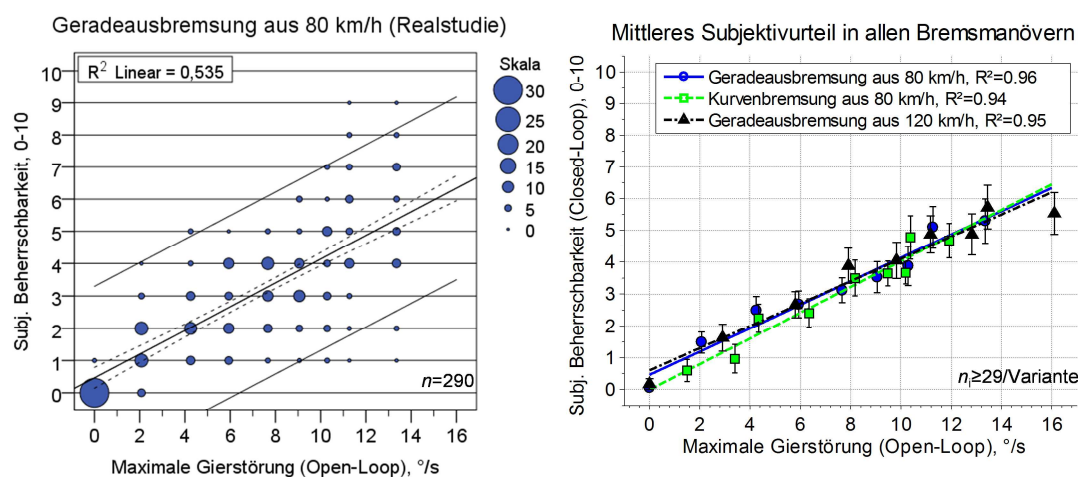


Bild 5.9 Mittlere subjektive Beherrschbarkeit infolge der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichungen (Gierstörungen) in den Bremsmanövern der Realstudie, bereits veröffentlicht⁴³³

⁴³³ Simmermacher, Winner (2011): Lane Keeping Ability of normal Drivers in Braking Manoeuvres

Die Verteilungscharakteristik der Einzelbeurteilungen aus Bild 5.9 (links) in Geradeausbremsung aus 80 km/h entspricht dabei ebenfalls einer heteroskedastischen Verteilung mit über $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ ansteigenden Varianzen. Die auf einer konstanten Varianz basierenden Vertrauensbereiche der gesamten Regressionskurve können daher nicht für die Vorhersage einer Einzelstichprobe verwendet werden. Im Unterschied zur Charakteristik der objektiven Beherrschbarkeit von Bremsmanövern steigt die subjektive Störbeurteilung in allen Bremsmanövern der Realstudie aus Bild 5.9 (rechts) jedoch nicht progressiv, sondern linear über dem Betrag der Open-Loop-Gierstörung an. Die Regression der Mittelwerte in den einzelnen Gierstörungsvarianten zeigt mit $R^2 = 0,93 - 0,96$ eine fast vollständige Varianzerklärung. Somit kann von einem linearen Verlauf der mittleren Subjektivbeurteilung über der Gierstörung ausgegangen werden. Zudem sind keine Abweichungen zwischen der Subjektivbeurteilung in Geradeausbremsung aus 120 und 80 km/h nachweisbar. Bei Kurvenbremsung aus 80 km/h können zwar vereinzelt statistisch signifikante Abweichungen der Mittelwerte des Subjektivurteils nachgewiesen werden, die Regressionsgerade der mittleren Bewertung in Bild 5.9 (rechts) zeigt jedoch betragsmäßig vergleichbare Subjektivbeurteilung mit geringfügig um ca. 0,5 Bewertungspunkte unkritischer bewerteten Gierstörungen unterhalb von $\Delta\dot{\psi}_{\text{ref,max}} = 4^\circ/\text{s}$.

5.3.2 Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrsimulator)

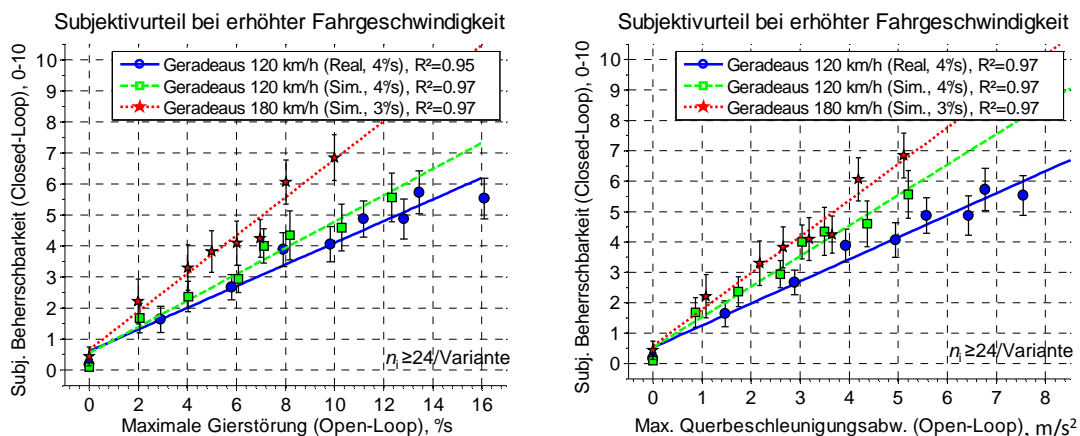


Bild 5.10 Vergleich der mittleren Subjektivbeurteilung zwischen Realstudie (120 km/h) und Fahrsimulatorstudie (120-180 km/h) über den maximalen Gierstörungen und Querbeschleunigungsabweichungen

Im Unterschied zu den signifikanten und im Betrag deutlichen Abweichungen der objektiven Beherrschbarkeit in identischer Geradeausbremsung aus 120 km/h zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie zeigen sich für die Subjektivbeurteilung nach Bild 5.10 (links) geringere Differenzen: In den Einzelvarianten mit vergleichbaren Gierstörungsbeträgen (ca. $6^\circ/\text{s}$, ca. $8^\circ/\text{s}$ und ca. $10^\circ/\text{s}$) können keine statistisch signifikanten Abweichungen der Mittelwerte der Subjektivurteile voneinander nachgewiesen werden. Erst

ab ca. $12^\circ/\text{s}$ tritt erstmals eine statistisch signifikante Abweichung auf. Dennoch deutet der Verlauf der Regressionsgerade für beide Geradeausbremsungen eine um ca. 20 % geringfügig kritischere Subjektivbeurteilung in den Bremsmanövern am Fahrsimulator an. Diese Tendenz kann in Abhängigkeit von $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ jedoch nicht durchgängig statistisch belegt werden. Die Abweichungen der mittleren Subjektivurteile in Geradeausbremsung aus 180 km/h sind hingegen mit Ausnahme der Einzelvarianten bei $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 0^\circ/\text{s}$, $2^\circ/\text{s}$ und $7^\circ/\text{s}$ im Vergleich zur Geradeausbremsung aus 120 km/h (Fahrsimulator) statistisch signifikant und im Betrag deutlich ausgeprägt. Die prozentuale Differenz liegt ab einer Gierstörung von $2^\circ/\text{s}$ im Minimum bei ca. 6 % ($\Delta\dot{\psi}_{\max} = 7^\circ/\text{s}$), im Maximum bei ca. 49 % ($\Delta\dot{\psi}_{\max} = 10^\circ/\text{s}$) und im Mittel bei ca. 34 %. Diese prozentuale Abweichung der mittleren Subjektivurteile bei erhöhter Ausgangsfahrgeschwindigkeit (180 km/h) entspricht in etwa der prozentualen Abweichung der mittleren Kursabweichungen (ca. 36 %). Bei Auswahl der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung $\Delta a_{y,\max}$ als objektivem Bewegungskennwert in Bild 5.10 (rechts) nähern sich die Subjektivbeurteilungen analog der objektiven Beherrschbarkeit einander an. Im Bereich zwischen $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 3\text{--}3.5 \text{ m/s}^2$ können keine statistisch signifikanten Abweichungen der mittleren Subjektivbeurteilungen voneinander nachgewiesen werden. Die mittleren Störbeurteilungen in Geradeausbremsung aus 180 km/h sind oberhalb von $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 4 \text{ m/s}^2$ wiederum statistisch signifikant und im Betrag deutlich höher ausgeprägt als bei Bremsung aus 120 km/h.

Die Abweichung der mittleren Subjektivbeurteilungen in identischer Geradeausbremsung aus 120 km/h zwischen Real- und Fahrsimulatorstudie werden durch die Darstellung über der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung $\Delta a_{y,\max}$ nach Bild 5.10 (rechts) in einzelnen Stellvarianten wiederum statistisch signifikant und im Betrag deutlicher ausgeprägt als in der Darstellung über der Open-Loop-Gierstörung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$.

5.4 Vergleich von subjektiver und objektiver Beherrschbarkeit

In bisherigen Studien zur Ermittlung von Akzeptanzgrenzen für Lenksystemstörungen wird – wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben – davon ausgegangen, dass die Subjektivbeurteilung im Vergleich zu einer erfolgreichen Kurshaltung das „konservativere“ und somit geeignetere Kriterium darstellt.⁴³⁴ Zur Bewertung dieser Hypothese wird die subjektive Beherrschbarkeit dem objektiven Kurshaltevermögen gegenübergestellt. Zusätzlich er-

⁴³⁴ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 3

folgt eine Betrachtung der subjektiven Beherrschbarkeit in allen Einfahrrten, in denen der Fahrstreifen durch die Räder des Fahrzeugs verletzt wird und ein konkretes Unfallereignis mit einer Pylone auftritt.

5.4.1 Gegenüberstellung in Geradeausbremsungen aus 80-180 km/h

Bild 5.11 zeigt die mittleren maximalen Kursabweichungen $\Delta\bar{y}_{\max,4s}$ und die mittleren minimalen Begrenzungsabstände $\Delta\bar{y}_{\text{ref,min},4s}$ über der mittleren Störbeurteilung durch Normalfahrer in Geradeausbremsungen aus 80 km/h (Realstudie), 120 km/h (Realstudie + Fahrsimulator) und 180 km/h (Fahrsimulator). Aufgrund der bereits diskutierten linearen Abhängigkeit der Subjektivbeurteilung von den Open-Loop-Bewegungskennwerten und der progressiven Zusammenhänge der objektiven Beobachtungskriterien wird erwartungsgemäß eine progressive Zunahme der mittleren Kursabweichung und eine progressive Abnahme des mittleren Begrenzungsabstandes über der linearen Zunahme der mittleren Subjektivbeurteilung festgestellt.

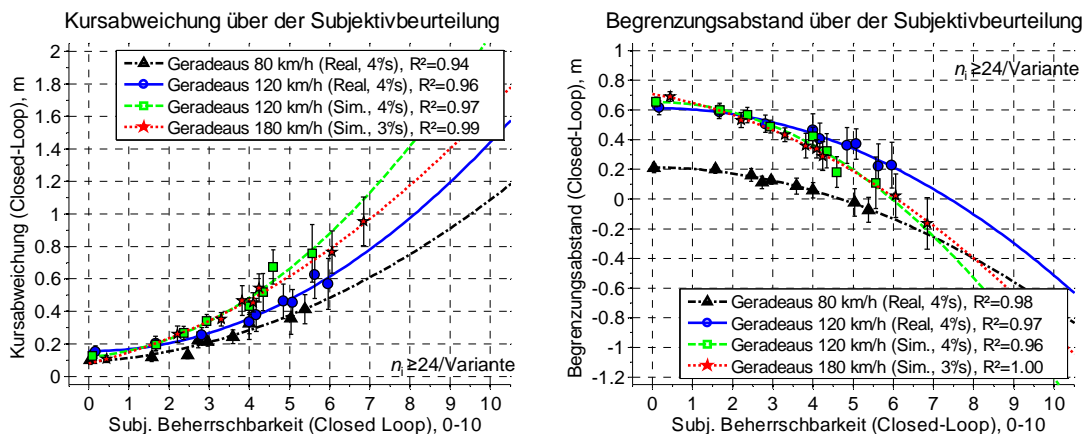


Bild 5.11 Gegenüberstellung des objektiven Kurshaltevermögens und der subjektiven Beherrschbarkeit in Geradeausbremsung aus 80-180 km/h

Die in Bild 5.11 dargestellten Zusammenhänge zwischen subjektiver und objektiver Beherrschbarkeit sind durch quadratische Modellansätze mit einer hohen Varianzaufklärung abbildbar ($R^2 = 0,94 - 1,00$). Innerhalb der Geradeausbremsungen am Fahrsimulator scheint zudem unabhängig von der Ausgangsfahrgeschwindigkeit ein konstanter Zusammenhang zwischen der mittleren Kursabweichungen, den mittleren Begrenzungsabständen und den mittleren Subjektivbeurteilungen der untersuchten Hinterachs-Störvarianten zu bestehen. Bis auf eine Einzelvariante kann bei vergleichbarer Subjektivbeurteilung keine statistisch signifikante Abweichung der Mittelwerte der objektiven Beherrschbarkeit voneinander festgestellt werden. Die Regressionskurven der Bremsmanöver am Fahrsimulator aus 120 und 180 km/h verlaufen sowohl für die Kursabweichung als auch für die mittleren Begrenzungsabstände annähernd deckungsgleich.

In der Gegenüberstellung des Zusammenhangs von subjektiver und objektiver Beherrschbarkeit weichen die Ergebnisse der Realstudie jedoch von der Fahrsimulatorstudie ab: Vergleichbare mittlere Kursabweichungen und Begrenzungsabstände werden im Vergleich der beiden Geradeausbremsungen aus 120 km/h ab mittleren Störausprägungen ($\Delta\dot{\psi}_{\max} > \text{ca. } 6^\circ/\text{s}$ Gierstörung) in den Bremsungen am Fahrsimulator im Mittel um etwa einen ganzen Bewertungspunkt schlechter beurteilt. Vergleichbare Kursabweichungen in Geradeausbremsungen aus 80 km/h bei reduzierter Fahrstreifenbreite (2,5 m statt 3,5 m) werden innerhalb der Realstudie über alle Gierstörungsausprägungen hinweg – mit Ausnahme der ungestörten Fahrt – im Mittel nochmals um etwa einen Bewertungspunkt schlechter beurteilt als die Bremsungen aus 120 km/h in Realfahrt. Als Ursache hierfür kann der aufgrund einer geringeren Fahrstreifenbreite (2,5 m) bereits ohne Störaufschaltung im Mittel um ca. 40 cm niedrigere Begrenzungsabstand angenommen werden, siehe Bild 5.11 (rechts).

Während innerhalb der Fahrsimulatorstudie ein geschwindigkeitsübergreifender Zusammenhang zwischen objektiver und subjektiver Beherrschbarkeit nicht ausgeschlossen werden kann, scheint also auch hier eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Auswahl des Versuchsinstruments zu bestehen. Die auftretenden Begrenzungsabstände sind zudem nach Bild 5.11 (rechts) bei abweichenden Fahrstreifenbreiten kein geeignetes Kriterium zur manöverübergreifenden Erklärung der subjektiven Beherrschbarkeit von Gierstörungen. Der Zusammenhang zwischen mittlerer Kursabweichung, mittlerem Begrenzungsabstand und der mittleren Subjektivbeurteilung kann also nicht als allgemein gültig angesehen werden.

5.4.2 Subjektive Beherrschbarkeit von Fahrstreifenverletzungen

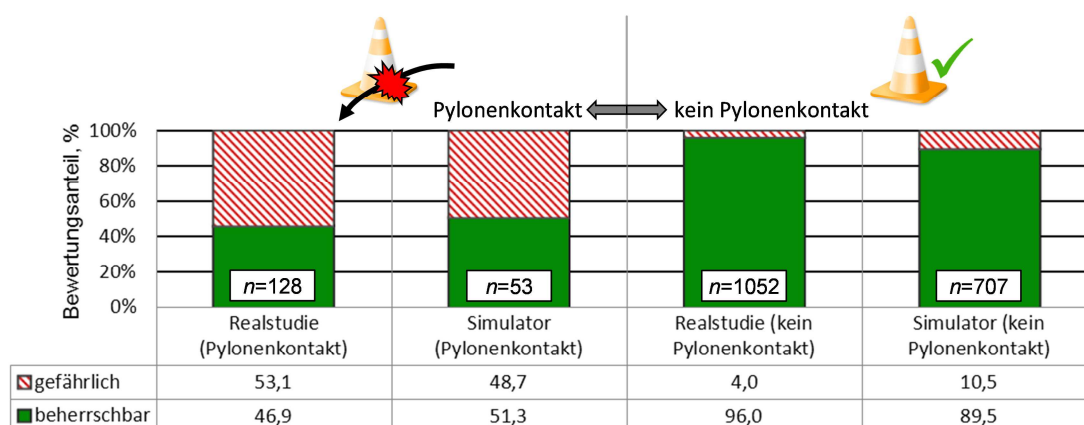
Tabelle 5.4 vergleicht die subjektive Einstufung der Beherrschbarkeit durch Normalfahrer in Fahrten mit und ohne auftretende Pylonen-Kollision infolge einer Fahrstreifenverletzung. Dabei wird die subjektive Einstufung anhand der in der verwendeten Beherrschbarkeitsskala enthaltenen subjektiven Akzeptanzgrenze in die beiden Klassen

- „beherrschbar“ ($B_{S,i} = 0-6$) und
- „gefährlich“ ($B_{S,i} = 7-10$)

eingeteilt. Den Annahmen aus der Literatur folgend, dürften keine Pylonenkontakte auftreten, die durch die Normalfahrer nicht als gefährlich eingestuft werden. In der Realstudie werden von 128 Pylonenkontakten durch Hinterrad-Störaufschaltung jedoch nur 53,1 % der Fahrten als „gefährlich“ eingestuft und in den untersuchten Bremsmanövern am Fahrsimulator nur 48,7 %. Dieses Ergebnis weicht deutlich von der Erwartungshaltung ab, da die Probanden im Vorfeld der Tests konkret auf den Bezug eines Pylonenkontakts zu einem möglichen realen Unfallereignis hingewiesen wurden. Im Gegensatz

zu dieser Abweichung von der erwarteten Subjektivbeurteilung werden Fahrten ohne Pylonenkontakt in der Realstudie zu 96 % auch als subjektiv „beherrschbar“ eingestuft. Am Fahrsimulator bewerten ca. 90 % das Fahrzeugverhalten als beherrschbar, wenn keine Pylone touchiert wird.

Tabelle 5.4 Subjektive Beherrschbarkeit von Bremsmanövern in Abhängigkeit von aufgetretenen Pylonenkontakten



Die subjektive Beherrschbarkeit ist in dieser Studie also nicht dazu geeignet, eine objektiv sichere Kurshaltung zu erklären. Ein objektiv sicheres Kurshaltevermögen schließt wiederum speziell in der Realstudie einen Großteil der subjektiven Fahrsicherheit mit ein (96 %) und erscheint damit als das geeignetere Kriterium, um die objektive Fahrsicherheit infolge von Hinterachs-Störaufschaltungen zu bewerten.

5.4.3 Nachweis von Trainingseffekten über der Versuchsdauer

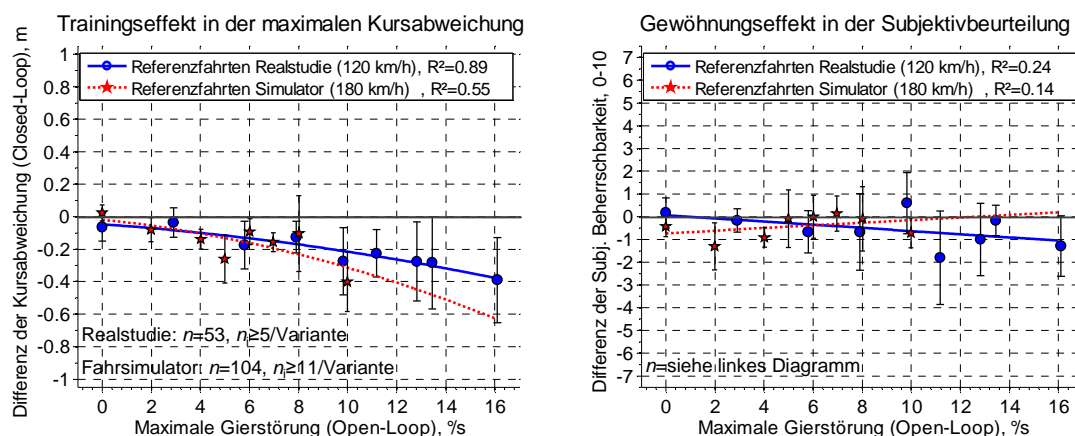


Bild 5.12 Prüfung von Trainingseffekten in der Kursabweichung und Gewöhnungseffekten in der Subjektivbeurteilung

Zum Abschluss der Diskussion des objektiven und subjektiven Kurshaltevermögens in Bremsmanövern wird geprüft, ob die Anzahl der Versuchswiederholungen zu einem nachweisbaren Trainingseffekt im erzielten Kurshaltevermögen oder zu Gewöhnungseffekten in der Subjektivbeurteilung der Normalfahrer führt. Hierzu wird die Differenz

der Kursabweichung und des Subjektivurteils zwischen der ersten Versuchsvariante eines Probanden und der letzten Versuchsvariante (Referenzfahrt) mit identischer Open-Loop-Gierstörung bzw. HA-Störaufschaltung ermittelt. Da es sich bei der Prüfung der Ausgangshypothese $H_0 =$ „kein Gewöhnungs- oder Trainingseffekt“ um einen „einseitigen“ Test handelt, werden die 90 %-Vertrauensbereiche der Mittelwerte dieser Differenzen bei der jeweiligen Gierstörungsvariante gebildet, dargestellt in Bild 5.12. Schließt der 90 %-Vertrauensbereich eines Mittelwerts die Null-Linie nicht mit ein, wird die Ausgangshypothese auf dem üblichen Signifikanzniveau von $\alpha_s = 0,05$ zu Gunsten der Annahme eines auftretenden Trainings- oder Gewöhnungseffekts verworfen. Die Prüfung der Trainingseffekte in der mittleren maximalen Kursabweichung $\Delta \bar{y}_{\max, 4s}$ aus Bild 5.12 (links) belegt nachweisbare Trainingseffekte ab Open-Loop-Gierstörungen von $\Delta \dot{\psi}_{\max} = \text{ca. } 6^\circ/\text{s}$ in Geradeausbremsung aus 120 km/h (Realstudie). Der Verlauf der quadratischen Regressionskurve signalisiert zudem eine progressive Zunahme des Trainingseffekts über der Open-Loop-Gierstörung ($R^2 = 0,89$). Auch in Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrsimulatorstudie) sind bis auf eine Ausnahme ($\Delta \dot{\psi}_{\max} = 8^\circ/\text{s}$) in allen Versuchsvarianten der Geradeausbremsung aus 180 km/h ab $\Delta \dot{\psi}_{\max} = 2^\circ/\text{s}$ Trainingseffekte nachweisbar. Im Maximum werden mittlere -0,4 m Differenz der $n_i \geq 11$ Referenzfahrten beobachtet ($\Delta \dot{\psi}_{\max} = 10^\circ/\text{s}$), im Minimum nur -0,1 m ($\Delta \dot{\psi}_{\max} = 8^\circ/\text{s}$).

Die mittleren Differenzen der Subjektivbeurteilungen in den Referenzfahrten zeigen hingegen keine durchgängig nachweisbaren Gewöhnungseffekte in der Subjektivbeurteilung. Vereinzelt werden in den Referenzfahrten sogar kritischere mittlere Subjektivbeurteilungen erzielt. Die ausbleibende Nachweisbarkeit von Gewöhnungs- bzw. von „Reihenfolgeeffekten“ entspricht den Beobachtungen aus anderen Studien zur subjektiven Beurteilung von Lenksystemstörungen.⁴³⁵

Während das objektive Kurshaltevermögen signifikanten Trainingseffekten unterworfen ist, kann also von weitestgehend versuchsdauerunabhängigen Subjektivbeurteilungen ausgegangen werden. Bei Absolvierung von nur einer Gierstörungsvariante pro Versuchsperson würde das objektive Kurshaltevermögen in Richtung eines verschlechterten mittleren Kurshaltevermögens verschoben. Dennoch ist das objektive Kurshaltevermögen aufgrund des dargestellten Zusammenhangs der zu ca. 50 % subjektiv als unkritischen beurteilten Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten aus Tabelle 5.4 nach den Ergebnissen dieser Studie das konservativere Kriterium zur Beurteilung der objektiven Fahrsicherheit.

⁴³⁵ Wesp et al. (2009): Einfluss der Systemauslegung hinterachsgelenkter Fahrzeuge

5.5 Beherrschbarkeit des Ausweichtests mit 80 km/h

Die Auswertung der objektiven und subjektiven Beherrschbarkeit im Ausweichtest erfolgt in Abhängigkeit der individuell auftretenden maximalen Closed-Loop-Hinterachs-Schwimmwinkel $\beta_{HA,max}$. Das objektive Kurshaltevermögen wird anhand der Anteile der drei möglichen Ereignisse

- Kursverletzungen in der Anlenkphase
- Kursverletzungen in der darauf folgenden Stabilisierungsphase
- und keine auftretende Kursverletzung

beurteilt.

5.5.1 Objektives Kurshaltevermögen bei hohen HA-Schwimmwinkeln

Bild 5.13 zeigt die Anteile der beobachteten Kursverletzungen mit Pylonenkontakten über den fünf gewählten Klassen der aufgetretenen maximalen Hinterachs-Schwimmwinkel. Bei HA-Schwimmwinkeln unterhalb von 5° werden in etwa 30 % der Fälle Kursverletzungen mit einer Pylone des zu umfahrenden Hindernisses erzielt. Bis hin zu $\beta_{HA,max} = 5-6^\circ$ treten gleichzeitig keine Kursverletzungen in der nachfolgenden Stabilisierungsphase auf. Dieser Zusammenhang ist plausibel, da infolge einer zu zögerlichen Lenkanregungen – bzw. einer zu zögerlichen Fahrzeugreaktion auf die Lenkbe-
fehle des Fahrers – nur geringe maximale Schwimmwinkel erzielt werden ($\beta_{HA,max} < 5^\circ$).

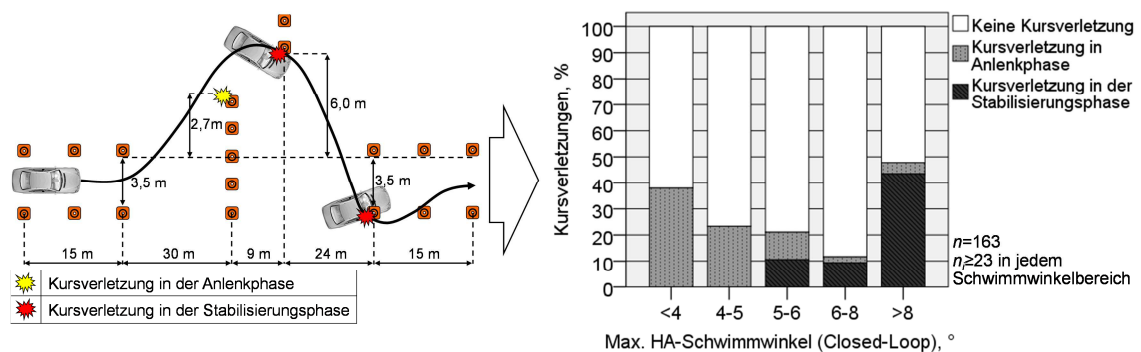


Bild 5.13 Beobachtete Kursverletzungen der Testpersonen im Ausweichtest in Abhängigkeit des maximalen HA-Schwimmwinkels, bereits veröffentlicht⁴³⁶

Eine erhöhte Lenkintensität, ausgedrückt über den Integralwert der Lenkradgeschwindigkeit über der Manöverdauer, führt den Ergebnissen der Korrelationsanalyse aus Kapitel 5.1.2 folgend zu höheren HA-Schwimmwinkeln. Die Fahrer können mit verstärkten Lenkeingaben dem Hindernis besser ausweichen, sind aber in den Bereichen von

⁴³⁶ Simmermacher, Winner (2011): Beherrschbarkeit von Gierstörungen durch ein Fahrerkollektiv, S. 696ff

maximalen HA-Schwimmwinkeln $\beta_{HA,max} = 5-6^\circ$ und $6-8^\circ$ teilweise nicht mehr in der Lage, das Fahrzeug innerhalb der Fahrbahnbegrenzung zu stabilisieren. In jeweils ca. 10 % der Fälle treten Kursverletzungen auf, siehe Bild 5.13 (rechts). In den Ausweichtests mit einem maximalen HA-Schwimmwinkel $\beta_{HA,max} > 8^\circ$ können schließlich ca. 43 % der Normalfahrer das Fahrzeug nicht mehr sicher innerhalb des vorgesehenen Fahrstreifens stabilisieren. Einen Erklärungsansatz dieser deutlichen Häufung oberhalb von 8° HA-Schwimmwinkel kann die Charakteristik heutiger Fahrzeug-Reifen liefern: Heutige Reifen erzielen ihr Kraftschlussmaximum im Bereich zwischen ca. $5-10^\circ$ Schräglaufwinkel.⁴³⁷ Der Hinterachs-Schwimmwinkel des Einspurmodells entspricht dabei abgesehen von den vorgenommenen Lenkeingriffen an der Hinterachse (bis zu 2° bei maximaler Querbeseleunigung) und der Hinterachskinematik in etwa dem Schräglaufwinkel der Hinterräder $\alpha_{h,i}$. Wird dieser Schräglaufwinkelbereich der maximalen Seitenführungskraft von ca. $5-10^\circ$ überschritten, ist ein kritischer Seitenkraftverlust der Hinterachse und folglich ein unkontrolliertes Eindrehen des Fahrzeugs (Schleuderbewegung) zu erwarten. In dieser Studie wurde in $n = 12$ Ausweichtests ein HA-Schwimmwinkel oberhalb von 10° erzielt. Sowohl ein zu zögerliches Anlenken als auch eine zu starke Fahrzeugreaktion in Form hoher HA-Schwimmwinkel führen zu einer Einschränkung der objektiven Fahrsicherheit in Ausweichtests.

Das beobachtete Kurshaltevermögen von Normalfahrern in Abhängigkeit des HA-Schwimmwinkels aus Bild 5.13 (rechts) gilt ebenfalls für den Zusammenhang des Kurshaltevermögens in Bezug auf die maximalen Schwimmwinkel im Schwerpunkt des Fahrzeugs $\beta_{SP,max}$. Die maximalen HA-Schwimmwinkel im Bereich zwischen $\beta_{HA,max} =$ ca. $3-8^\circ$ entsprechen nach Bild 5.14 (rechts) den um jeweils $\beta_{HA,max} - \beta_{SP,max} =$ ca. $1,2-1,5^\circ$ niedrigeren Schwimmwinkeln im Schwerpunkt des Fahrzeugs $\beta_{SP,max}$.

5.5.2 Subjektive Beherrschbarkeit von hohen HA-Schwimmwinkeln

Die Verteilung der Einzelbeurteilungen aus Bild 5.14 (links) über den maximalen HA-Schwimmwinkeln $\beta_{HA,max}$ zeigt eine hohe Varianz der Subjektivbeurteilung bei vergleichbaren Schwimmwinkelbeträgen. Die Regression für die Einzelbeurteilungen mit einem linearen Modellansatz kann dementsprechend nur eine geringe Varianzaufklärung von ca. 29 % aufweisen. Zur Verdeutlichung des linearen Modellzusammenhangs zwischen der mittleren Subjektivbeurteilung und den maximalen Schwimmwinkel im Closed-Loop werden die Ausweichtests in fünf Schwimmwinkel-Klassen mit jeweils mindestens 30 Einzelfahrten unterteilt. Die $n = 12$ Ausweichtests mit deutlich überhö-

⁴³⁷ Schmid, Förschl (2009): Vom realen zum virtuellen Reifen – Reifenmodellparametrierung, S. 188ff

ten Schwimmwinkeln $\beta_{HA,max} > 10^\circ$ werden für die Auswertung der Modellabhängigkeit nicht berücksichtigt.

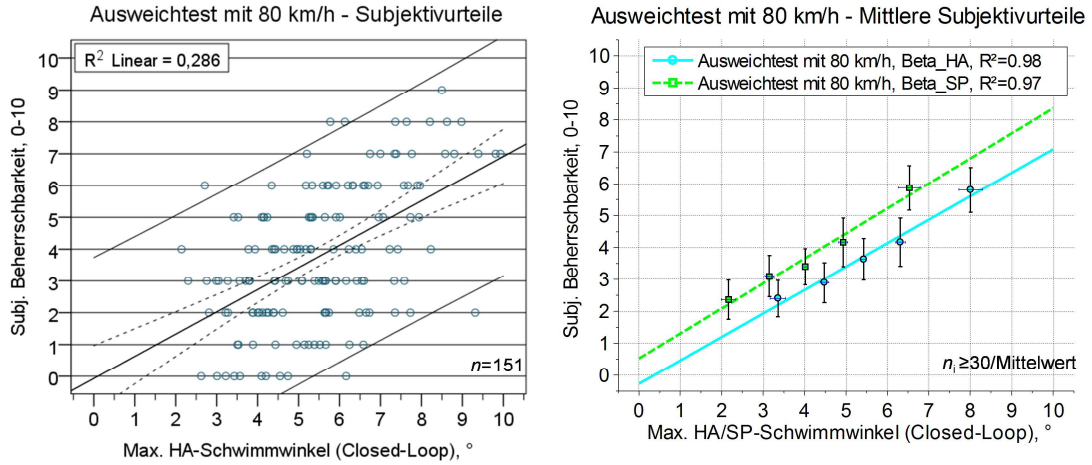


Bild 5.14 Subjektivbeurteilung in Abhängigkeit hoher HA- und SP-Schwimmwinkel im Ausweichtest mit 80 km/h

Die Regressionskurve der jeweils fünf gebildeten Mittelwerte der Störbeurteilung zeigt nach Bild 5.14 (rechts) eine eindeutig lineare Tendenz über den auftretenden mittleren Schwimmwinkeln an der Hinterachse und im Schwerpunkt des Fahrzeugs mit einer Varianzaufklärung von $R^2 = 0,97-0,98$. Im Bereich zwischen $\beta_{HA,max} = \text{ca. } 3-8^\circ$ bzw. $\beta_{SP,max} = \text{ca. } 1,8-6,5^\circ$ kann in dieser Studie also von einem linearen, sogar nahezu proportionalen Anstieg der mittleren Störbeurteilung über den auftretenden HA-/SP-Schwimmwinkel in Ausweichtests ausgegangen werden.

5.6 Fazit

Die Untersuchung der Hinterrad-Störaufschaltungen belegt einen hochsignifikanten Korrelations-Zusammenhang der objektiven sowie subjektiven Beherrschbarkeit mit der maximalen Open-Loop-Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta\dot{\psi}_{max}$. Zwischen den verschiedenen objektiven Bewegungskenngrößen aus $\dot{\psi}$, a_y und $\beta_{HA/SP}$ besteht ein annähernd funktionaler Zusammenhang. Daher kann keine eindeutige Aussage getroffen werden, welcher der gängigen Bewegungskennwerte am besten zur Erklärung des Kurshaltevermögens geeignet ist. Die Maximalwerte $\Delta\dot{\psi}_{max}$, $a_{y,max}$ und $\beta_{HA/SP,max}$ sind in dieser Studie jedoch speziell in Kurvenbremsung besser als die oftmals postulierten Ein-Sekunden-Werte dazu geeignet, die subjektive Beherrschbarkeit und den Lenkaufwand zu erklären. Bei verringerten Zeitverzügen der Maximalwerte nach Störaufschaltung durch eine erhöhte Verstellodynamik der Hinterachse ($\dot{\delta}_h = 20^\circ/\text{s}$ statt $4^\circ/\text{s}$) tritt zudem keine nachweisbare Veränderung der mittleren Kursabweichungen oder der mittleren

Abstände von der Fahrstreifenbegrenzung über identischen Giergeschwindigkeitsabweichungen $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ (Gierstörungen) auf. Dies spricht für die Auswahl von zeitlich unabhängigen Maximalwerten der Bewegungskenngrößen als objektive Open-Loop-Kennwerte.

Die mittlere maximale Kursabweichung der Normalfahrer steigt in allen durchgeführten Bremsmanövern der Real- und Fahrsimulatorstudie progressiv über dem Betrag der Open-Loop-Gierstörungen an. Gleichzeitig nimmt der verbleibende mittlere Abstand von der Fahrstreifenbegrenzung progressiv ab. Die mittleren Störbeurteilungen steigen in allen Bremsmanövern linear über der Störausprägung an. Die Abhängigkeit der Mittelwerte der objektiven Kurshaltungskriterien (Kursabweichung, Begrenzungsabstand) von der Störausprägung kann in allen Geradeausbremsungen (80-180 km/h) durch quadratische Modellansätze fast vollständig erklärt werden (Varianzaufklärung $R^2 = 0,95-0,99$). Eine vergleichbare Anpassungsgüte wird für die mittleren Subjektiveurteilungen durch lineare Modellansätze erzielt ($R^2 = 0,94-0,97$). Erste Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten werden in den Geradeausbremsungen aus 80-120 km/h im Bereich zwischen $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 7-8^\circ/\text{s}$ beobachtet. Das Kurshaltevermögen ist in Geradeausfahrt mit 80 km/h zudem unabhängig davon, ob die Störungen für den Fahrer unerwartet oder an die Bremsbetätigung gekoppelt aufgeschaltet werden. Im Gegensatz zu den Geradeausbremsungen tritt in Kurvenbremsung aus 80 km/h bereits in ungestörter Fahrt ein deutlich eingeschränktes Kurshaltevermögen auf, in dessen Folge ca. 26 % der Fahrer geringe Fahrstreifenverletzungen ohne Pylonenkontakte erzielen. Erste signifikante Einschränkungen des objektiven Kurshaltevermögens in Kurvenbremsung im Vergleich zur ungestörten Fahrt können erst ab ca. $\Delta\dot{\psi}_{\text{ref},\max} = 10^\circ/\text{s}$ nachgewiesen werden.

In der Fahrsimulatorstudie wird im Vergleich zur Realstudie bei identischen Geradeausbremsungen aus 120 km/h ab ca. $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 6^\circ/\text{s}$ eine um mehr als 50 % höhere mittlere Kursabweichung erzielt. Die Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie sind somit nicht uneingeschränkt auf die Beherrschbarkeit des realen Testfahrzeugs übertragbar. Bei erhöhter Ausgangsfahrgeschwindigkeit von 180 km/h treten im Vergleich zu Geradeausbremsungen aus 120 km/h (Fahrsimulator) eine um ca. 36 % höhere Kursabweichung und eine um ca. 34 % verschlechterte Subjektiveurteilung von identischen Open-Loop-Gierstörungen auf. Bereits ab $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 5^\circ/\text{s}$ werden in Geradeausbremsung aus 180 km/h erste Pylonenkontakte beobachtet. Bei Verwendung der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung $\Delta a_{y,\max}$ als objektivem Bewegungskennwert ist die fahrgeschwindigkeitsabhängige Differenz der Beobachtungsgrößen geringer ausgeprägt und im Bereich mittlerer Störaufschaltungen bis $\Delta a_{y,\max} = 3,5 \text{ m/s}^2$ sogar nicht nach-

weisbar. Erste Fahrstreifenverletzungen mit Pylonenkontakten treten am Fahrsimulator bei ähnlichen Querschleunigungsabweichungen von $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 3 \text{ m/s}^2$ (120 km/h) und $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 2,7 \text{ m/s}^2$ (180 km/h) auf. In der Realstudie werden in Geradeausbremsung aus 120 km/h erste Pylonenkontakte hingegen erst bei $\Delta a_{y,\max} = \text{ca. } 3,9 \text{ m/s}^2$ erzielt.

Im Vergleich der subjektiven und objektiven Bewertungskriterien erscheint das objektive Kurshaltevermögen trotz der über die Versuchsdauer nachweisbaren Trainingseffekte in der maximalen Kursabweichung in dieser Studie als das geeignetere und im Vergleich zur Subjektivbeurteilung entgegen der Erwartung konservativere Beurteilungskriterium für die erzielte Fahrsicherheit. Aufgetretene Pylonenkontakte werden in der Realstudie nur zu ca. 53 % als subjektiv „gefährlich“ eingestuft. Erfolgt eine objektiv sichere Fahrt (kein Pylonenkontakt) resultiert in der Realstudie in 96 % der Fälle auch eine subjektive Einschätzung als „beherrschbar“.

In den durchgeführten Ausweichtests sind die auftretenden maximalen Closed-Loop-Schwimmwinkel der Einzelfahrten am besten dazu geeignet, den Zusammenhang des Fahrzeugverhaltens mit der subjektive Beherrschbarkeit zu erklären. Es besteht ein linearer Zusammenhang der mittleren Subjektivbeurteilung über den auftretenden Schwimmwinkeln im Schwerpunkt und an der Hinterachse. Die Normalfahrer zeigen in den Ausweichtests zudem ein weitestgehend vom Fahrzeugverhalten unabhängiges Lenkverhalten. Ein korrelativer Zusammenhang der Lenkarbeit mit dem Mitlenkfaktor der Hinterachse ist nicht nachweisbar ($R_P = -0,01$). Die Intensität der Lenkeingaben ist neben dem variierten Mitlenkfaktor der Hinterachse jedoch ausschlaggebend dafür, ob hohe HA- und SP-Schwimmwinkel erzielt werden. Im Bereich geringer HA-Schwimmwinkel von $\beta_{HA,\max} < 5^\circ$ bzw. geringer SP-Schwimmwinkel von $\beta_{SP,\max} < 3,7^\circ$ treten keine Kursverletzungen in der Stabilisierungsphase auf, allerdings erfolgt in ca. 30 % der Fälle eine Kollision mit dem Hindernis. Im Bereich zwischen $\beta_{HA,\max} = 5\text{--}6^\circ$ bzw. $\beta_{SP,\max} = 3,7\text{--}4,6^\circ$ werden in 10 % der Fahrten erste Kursverletzungen in der Stabilisierungsphase beobachtet. Bei maximalen HA-Schwimmwinkeln von $\beta_{HA,\max} > 8^\circ$ bzw. SP-Schwimmwinkeln von $\beta_{SP,\max} > 6,5^\circ$ wird das Fahrzeug schließlich in ca. 43 % der Ausweichtests nicht mehr korrekt innerhalb der Fahrgasse stabilisiert.

6 Ermittlung von Akzeptanzgrenzen und Ausblick

Das erklärte Ziel dieser Arbeit besteht in der Ermittlung von Akzeptanzgrenzen für die objektiven Bewegungskennwerte des Fahrzeugverhaltens in Brems- und Ausweichtests. Auf Basis des ermittelten objektiven Kurshaltevermögens in Kapitel 5 wird daher eine Methode vorgestellt, die das objektive Kurshaltevermögen der Normalfahrer mit der erzielten Fahrsicherheit verknüpft und daraus nachvollziehbare Akzeptanzgrenzen für die objektiven Bewegungskenngrößen des Fahrzeugverhaltens ableitet. Die Ergebnisse dieser Diskussion werden anschließend mit den Erkenntnissen aus bisherigen Untersuchungen von Lenksystemstörungen verglichen und in ihrer Bedeutung für die Absicherung des Fahrzeugverhaltens diskutiert.

6.1 Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen in Bremsmanövern

6.1.1 Methodik

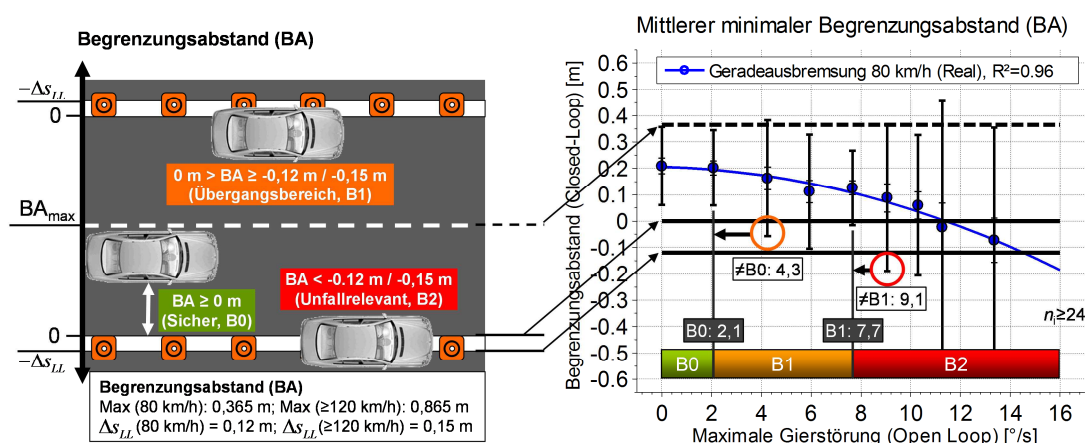


Bild 6.1 Bewertungsmethodik zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen in Bremsmanövern

Unter dem Begriff „Fahrsicherheit“ wird in dieser Arbeit eine sichere Kursführung der Normalfahrer innerhalb der definierten Fahrgassen verstanden. Schafft es der Fahrer, sein Fahrzeug innerhalb der Pylonen-begrenzten Fahrgasse zu stabilisieren, kann in jedem Fall von einem sicheren Fahrerergebnis ausgegangen werden. Reale Fahrstreifen sind nach der deutschen Richtlinie für Straßenmarkierungen RMS-1⁴³⁸ in der Regel durch eine Leitlinie vom Gegenverkehr getrennt und nach außen hin durch eine Randlinie begrenzt. Sowohl Leitlinie als auch Randlinie werden mindestens als „Schmalstrich“ ausgeführt und besitzen auf Autobahnen eine Breite von mindestens $\Delta s_{LL} = 15$ cm und auf anderen Straßen eine Breite von mindestens $\Delta s_{LL} = 12$ cm. Verlässt der Fahrer infolge

⁴³⁸ FGSV (1993): Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS-1)

einer Hinterachs-Störaufschaltung den Fahrstreifen, bietet sich nach Bild 6.1 eine Unterteilung der Fahrstreifenverletzungen in drei Kategorien an:

- B0: Stabilisierung innerhalb des Fahrstreifens (sicheres Fahrerergebnis)
- B1: Fahrstreifenverletzung ohne Überfahren der Begrenzungslinie
- B2: Fahrstreifenverletzung mit Überfahren der Begrenzungslinie.

Bei geringen Fahrstreifenverletzungen (B1) innerhalb der Breite der Begrenzungslinie ist ein Verunfallungsrisiko noch als niedrig einzuschätzen. Bei Überdeckungen mit dem Gegenverkehr oder einem Abkommen von der Fahrbahn durch ein Überfahren der Begrenzungslinie (B2) wird in dieser Arbeit hingegen von einem unfallrelevanten Ereignis mit möglichen Sach- und Personenschäden ausgegangen. Zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen für die objektiven Bewegungskennwerte wird ein statistisches Maß benötigt, das eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit von unfallrelevanten Fahrstreifenverletzungen durch Normalfahrer treffen kann. Der Anspruch an die Absicherung des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern ist idealerweise die Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch alle Normalfahrer. Der Nachweis eines Beherrschbarkeitsanteils von 100 % kann statistisch jedoch nicht sinnvoll erbracht werden. Zudem erscheint es unwahrscheinlich, dass ein Fahrzeug in Bremsmanövern – unabhängig von der Konstitution und der Fahrertüchtigkeit eines Fahrers – durch alle Führerscheinbesitzer auch ohne Hinterachs-Störeingriffe jederzeit sicher geführt wird. Nach Bild 6.1 (rechts) wird zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen der 95 %-Erwartungsbereich des erzielten Begrenzungsabstands über der maximalen Open-Loop-Gierstörung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ (bzw. $\Delta\dot{\psi}_{\text{ref},\max}$ in Kurvenbremsung) und der maximalen Open-Loop-Querschleunigungsabweichung $\Delta a_{y,\max}$ verwendet. Der 95 %-Erwartungsbereich zeigt an, in welchem Bereich der Begrenzungsabstand einer weiteren Einzelfahrt mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % liegen wird. Da für das Kurshaltevermögen nur Abweichungen des Begrenzungsabstands in Richtung zu Fahrstreifenverletzungen relevant sind, entspricht der 95 %-Erwartungsbereich einem Intervall mit nur 2,5 % statistischer Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines kritischeren Begrenzungsabstands. Die Verwendung der 95 %-Erwartungsbereiche zur Ableitung von objektiven Akzeptanzgrenzen erscheint also als ein geeignetes und – im Vergleich zu den in bekannten Studien verwendeten 85 %-Quantilen^{439,440} der subjektiven Störbeurteilung – konservatives Kriterium für eine Absicherungsaussage des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern.

⁴³⁹ Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 10f

⁴⁴⁰ Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

Die gesuchten Akzeptanzgrenzen auf dem Beherrschbarkeitsniveau B0 oder B1 ergeben sich nach Bild 6.1 (rechts) aus denjenigen Störvarianten, in denen keine Überschneidung der Erwartungsbereiche mit der Innenkante der Begrenzungslinie (Niveau B0) oder der Außenkante der Begrenzungslinie (Niveau B1) auftritt. Wird in der jeweils rechts benachbarten nächst höheren Störvariante eine kritischer eingestufte Überschneidung des Erwartungsbereichs mit der Begrenzungslinie erzielt, so wird aufgrund der beabsichtigten konservativen Aussage für die erzielte Fahrsicherheit das jeweils kritischere Beherrschbarkeitsniveau (B1 oder B2) für die nicht untersuchten Störausprägungen im Zwischenraum zwischen den beiden untersuchten Störvarianten angenommen, siehe am Beispiel der Geradeausbremsung aus 80 km/h aus Bild 6.1 (rechts). Das optimale Beherrschbarkeitsniveau B0 kann in Geradeausbremsung aus 80 km/h nur bis hin zu Open-Loop-Gierstörungen $\Delta\dot{\psi}_{\max} \leq 2,1^\circ$ angenommen werden, da ab $\Delta\dot{\psi}_{\max} = 4,3^\circ/\text{s}$ bereits eine Überschneidung des 95 %-Erwartungsbereichs mit der Begrenzungslinie auftritt. Das Beherrschbarkeitsniveau B1 kann wiederum bis $\Delta\dot{\psi}_{\max} \leq 7,7^\circ/\text{s}$ angenommen werden. Ab einer Open-Loop-Gierstörung von $9,1^\circ/\text{s}$ überschreitet der Vertrauensbereich die Begrenzungslinie und es wird von unfallrelevanten Einschränkungen des Kurshaltevermögens ausgegangen (Niveau B2). Auf Basis der 95 %-Erwartungsbereiche für die subjektive Beherrschbarkeit können ebenfalls subjektive Akzeptanzgrenzen ermittelt werden, siehe Darstellungen in Anhang 8.2. Das resultierende subjektive Beherrschbarkeitsniveau B0 liegt in dieser Betrachtung vor, wenn der Erwartungsbereich der Subjektivbeurteilung keine Bewertungen der Kategorie „gefährlich“ enthält ($B_{S,i} < 7$).

Die Erwartungsbereiche des Begrenzungsabstands werden auf Basis der ermittelten Verteilungen der Begrenzungsabstände in den jeweiligen Testvarianten bestimmt. Von den sechs Einzelverteilungen der Begrenzungsabstände derjenigen Störaufschaltungen, für die weiter unten eine konkrete Beherrschbarkeitsgrenze auf dem B1-Niveau bestimmt wird, kann in Geradeausbremsung aus 80 km/h (Realstudie), Geradeausbremsung aus 120 km/h ($\dot{\delta}_h = 20^\circ/\text{s}$, Fahrsimulatorstudie) und Geradeausbremsung aus 180 km/h (Fahrsimulatorstudie) analog der Prüfung in Kapitel 4.4.3 eine Normalverteilung der Begrenzungsabstände angenommen werden. Unter Verwendung der parameterbasierten Vertrauensbereiche sind in diesen Bremsmanövern somit statistisch belastbare Grenzen zu erwarten. Um die ermittelten Akzeptanzgrenzen auf Basis von statistisch ungenauer prüfbar, da durch einzelne Ausreißer nicht nachweislich normalverteilten Begrenzungsabstände in Kurvenbremsung aus 80 km/h (Realstudie), Geradeausbremsung aus 120 km/h (Realstudie) und Geradeausbremsung aus 120 km/h ($\dot{\delta}_h = 4^\circ/\text{s}$, Fahrsimulatorstudie) abzusichern, wird die Beherrschbarkeit der Störaufschaltungen zusätzlich über einen Binomialansatz bewertet. Dieser zweite Bestandteil zur Ableitung von Akzep-

tanzgrenzen ist an die Bewertung der Kontrollierbarkeit eines Störereignisses nach den Vorgaben aus ISO 26262-3⁴⁴¹ zur Einstufung von Störungen des Fahrverhaltens durch ein mögliches Falschverhalten von elektronischen Fahrzeugkomponenten angelehnt. Die Normschrift zur Absicherung der funktionalen Sicherheit fordert hierbei eine Einstufung der Störungen in

- Fehlerschwere (Severity, S1-3)
- Auftrittswahrscheinlichkeit der kritischen Fahrsituation (Exposure, E1-E4)
- und Beherrschbarkeit des Falschverhaltens (Controllability, C0-C3)

zur Ableitung der ASIL-Einstufung (QM, A, B, C, D). Die ASIL-Einstufungen beinhaltet als Ergebnis eine tolerierte Fehlerhäufigkeit für die bewertete Störung, deren Überschreitung durch geeignete Maßnahmen in der Fahrzeugentwicklung ausgeschlossen werden muss.

Die genannten Beherrschbarkeitsklassen C0-C1 sind in Probandenversuchen üblicherweise aufgrund des zu hohen benötigten Stichprobenumfangs nicht nachweisbar (C0: 100 %, C1: ≥ 99 %). Die Absicherung in Probandenstudien erfolgt daher in der Regel auf dem Niveau C2 (≥ 90 %). Eine Absicherung der Wahrscheinlichkeit, dass mindestens 90 % der Fahrer in der Lage sind, eine Störsituation zu beherrschen, ist nach der ISO-Norm über die Prüfung der Hypothese $p_{\text{beherrschbar}} = 0,85$ auf dem Signifikanzniveau von 95 % zulässig. Die eingesetzte Probandenanzahl in dieser Studie ist auf den Nachweis dieses Kriteriums ausgelegt ($n = 30/\text{Variante}$). Als Indikator für eine durch den Fahrer nicht mehr beherrschbare Situation werden die in Real- und Fahrsimulatorstudie aufgezeichneten Pylonenkontakte verwendet. Zum Nachweis der Beherrschbarkeit auf dem C2-Niveau der funktionalen Sicherheit dürfen maximal zwei der 30 Fahrer mit einer Pylone kollidieren.

6.1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der beiden Methoden zur Definition von Akzeptanzgrenzen für die durchgeführten Bremsmanöver auf dem definierten Beherrschbarkeitsniveau B0-B1 (Objektiv) und C2 (ISO 26262-3) sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Die Auflistung enthält ebenfalls die ermittelten Akzeptanzgrenzen auf Basis der Erwartungsbereiche für die Subjektivbeurteilung (Spalte „Subjektiv“). In den durchgeführten Geradeausbremsungen aus 80 und 120 km/h der Realstudie werden auf dem Beherrschbarkeitsniveau B1 Akzeptanzgrenzen für eine Open-Loop-Gierstörung von ca. $\Delta\dot{\psi}_{\text{max,Obj,B1}} = 8^\circ/\text{s}$ ermittelt (7,7°/s und 7,9°/s). Die zugehörigen Open-Loop-Querschleunigungen liegen bei

⁴⁴¹ ISO 26262-3 (2011): Functional safety – Part 3: Concept phase

$\Delta a_{y,\max,Obj,B1} = 3,2\text{--}3,9 \text{ m/s}^2$. Im Bereich dieser Störausprägungen kann ebenfalls noch die Annahme einer Beherrschbarkeit der Bremsmanöver durch Normalfahrer auf dem C2 Niveau nach ISO 26262-3 angenommen werden. Die auf Basis der auftretenden Kollisionseignisse abgeleiteten Akzeptanzgrenzen auf dem C2-Niveau betragen im Vergleich höhere Grenzwerte von $\Delta \dot{\psi}_{\max,Fusi,C2} = 9,1\text{--}9,8^\circ/\text{s}$.

Tabelle 6.1 Übersicht der ermittelten Akzeptanzgrenzen für die maximale Gierstörung und Querbewegungsabweichung in den durchgeführten Bremsmanövern

Akzeptanzgrenzen		Objektiv				ISO 26262		Subjektiv	
Realstudie	Akzeptanzkriterium:	CI (95 %) Begrenzungsabstand				p(Pylonenkontakt)		CI (95%) Subj.	
	Obj. Kennwert:	$\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$		$\Delta a_{y,\max}$		$\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$	$\Delta a_{y,\max}$	$\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$	$\Delta a_{y,\max}$
	Beherrschbarkeitsniveau:	B0	B1	B0	B1	C2 (Fusi)	C2 (Fusi)	B0	B0
	Geradeausbremsung aus 80 km/h (4?s)	$\leq 2,1\%$	$\leq 7,7\%$	$\leq 0,9 \text{ m/s}^2$	$\leq 3,2 \text{ m/s}^2$	$\leq 9,1\%$	$\leq 3,7 \text{ m/s}^2$	$\leq 9,1\%$	$\leq 3,7 \text{ m/s}^2$
	Kurvenbremsung aus 80 km/h (4?s)	-	$(\leq 10,2\%)$	-	$(\leq 3,1 \text{ m/s}^2)$	$\leq 6,4\%$	$\leq 2,2 \text{ m/s}^2$	$\leq 10,2\%$	$\leq 3,1 \text{ m/s}^2$
	Geradeausbremsung aus 120 km/h (4?s)	$\leq 5,8\%$	$\leq 7,9\%$	$\leq 2,9 \text{ m/s}^2$	$\leq 3,9 \text{ m/s}^2$	$\leq 9,8\%$	$\leq 5,0 \text{ m/s}^2$	$\leq 5,8\%$	$\leq 2,9 \text{ m/s}^2$
Fahrsimulator	Akzeptanzkriterium:	CI (95 %) Begrenzungsabstand				p(Pylonenkontakt)		CI (95%) Subj.	
	Obj. Kennwert:	$\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$		$\Delta a_{y,\max}$		$\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$	$\Delta a_{y,\max}$	$\Delta \dot{\psi}_{(ref),\max}$	$\Delta a_{y,\max}$
	Beherrschbarkeitsniveau:	B0	B1	B0	B1	C2 (Fusi)	C2 (Fusi)	B0	B0
	Geradeausbremsung 120 km/h (4?s)	$\leq 7,1\%$	$\leq 7,1\%$	$\leq 3,0 \text{ m/s}^2$	$\leq 3,0 \text{ m/s}^2$	$\leq 7,1\%$	$\leq 3,0 \text{ m/s}^2$	$\leq 6,1\%$	$\leq 2,6 \text{ m/s}^2$
	Geradeausbremsung 120 km/h (20?s)	$\leq 7,0\%$	$\leq 7,0\%$	$\leq 2,9 \text{ m/s}^2$	$\leq 2,9 \text{ m/s}^2$	$\leq 7,0\%$	$\leq 2,9 \text{ m/s}^2$	$\leq 7,0\%$	$\leq 2,9 \text{ m/s}^2$
	Geradeausbremsung aus 180 km/h (3?s)	$\leq 4,0\%$	$\leq 6,0\%$	$\leq 2,2 \text{ m/s}^2$	$\leq 3,2 \text{ m/s}^2$	$\leq 6,0\%$	$\leq 3,2 \text{ m/s}^2$	$\leq 2,0\%$	$\leq 1,1 \text{ m/s}^2$

Für die Kurvenbremsung aus 80 km/h kann auf Basis der Vertrauensbereiche für den Begrenzungsabstand hingegen keine eindeutige Akzeptanzgrenze abgeleitet werden, da das Kurshaltevermögen bereits in ungestörter Kurvenfahrt nur ein B2-Niveau aufweist, siehe Anhang 8.1. Als Akzeptanzgrenze auf dem B1-Niveau wird daher diejenige Störausprägung verwendet, für die noch keine signifikante Abweichung des objektiven Kurshaltevermögens von der ungestörten Kurvenbremsung nachgewiesen werden kann ($\Delta \dot{\psi}_{ref,\max,Obj,B1} = 10,2^\circ/\text{s}$). Zudem gilt für Kurvenbremsungen mit dieser Störausprägung eine subjektive Beherrschbarkeit auf dem B0-Niveau, d.h. der 95 %-Erwartungsbereich der Subjektivbeurteilung überschreitet nicht die Akzeptanzgrenze hin zu einer Einstufung als „gefährlich“. Eine Beherrschbarkeit der Kurvenbremsungen auf dem C2-Niveau nach ISO 26262-3 kann anhand der aufgetretenen Pylonenkontakte hingegen nur bis $\Delta \dot{\psi}_{\max,Fusi,C2} = 6,4^\circ/\text{s}$ angenommen werden. Die Akzeptanzgrenzen auf Basis der Subjektivbeurteilungen sind in der Realstudie für Bremsungen aus 80 km/h vergleichbar oder weniger konservativ als die objektive Einstufung über die erzielten Begrenzungsabstände. Für die Geradeausbremsungen aus 120 km/h wird mit $\Delta \dot{\psi}_{\max,Subj,B0} = 5,8^\circ/\text{s}$ wiederum eine minimal konservativere subjektive Akzeptanzgrenze erzielt, die vergleichbar mit dem objektiven B0-Beherrschbarkeitsniveau ist. Die ermittelten Akzeptanzgrenzen für Gierstörungen in Geradeausbremsungen aus 120 km/h am Fahrsimulator zeigt auf dem Beherrschbarkeitsniveau B1 mit den Ergebnissen der Realstudie vergleichbare Akzeptanzgrenzen von ca. $\Delta \dot{\psi}_{\max,Obj,B1} = 7^\circ/\text{s}$. Dabei werden zugehörige Open-

Loop-Querbeschleunigungsabweichungen von $\Delta a_{y,\max,Obj,B1} = 2,9\text{-}3,0 \text{ m/s}^2$ erzielt. Erst bei einer Ausgangsfahrgeschwindigkeit von 180 km/h wird entsprechend des bereits nachgewiesenen signifikant verschlechterten Kurshaltevermögens über identischen Gierstörungen eine Akzeptanzgrenze von $\Delta \dot{\psi}_{\max,Obj,B1} = 6^\circ/\text{s}$ ermittelt. Die Akzeptanzgrenze der Querbeschleunigungsabweichung für Geradeausbremsungen aus 180 km/h ist auf dem B1-Niveau mit $\Delta a_{y,\max,Obj,B1} = 3,2 \text{ m/s}^2$ nach Tabelle 6.1 in etwa über der Fahrgeschwindigkeit konstant. Die abgeleiteten Akzeptanzgrenzen $\Delta \dot{\psi}_{\max,Fusi,C2}$ und $\Delta a_{y,\max,Fusi,C2}$ für eine Annahme des C2-Niveaus nach ISO 26262-3 sind innerhalb der Fahrsimulatorstudie mit den ermittelten Akzeptanzgrenzen auf B1-Niveau durchgängig identisch. Die subjektiven Akzeptanzgrenzen bewegen sich für Geradeausbremsungen aus 120 km/h ebenfalls in einem vergleichbaren Bereich ($\Delta \dot{\psi}_{\max,Subj,B0} = 6,1\text{-}7^\circ/\text{s}$), während Geradeausbremsungen aus 180 km/h durch die Probanden bereits ab $\Delta \dot{\psi}_{\max} = 4^\circ/\text{s}$ teilweise als „gefährlich“ eingestuft werden, so dass bereits ab $4^\circ/\text{s}$ kein subjektives B0-Niveau mehr erzielt werden kann. Die subjektiven Akzeptanzgrenzen $\Delta \dot{\psi}_{\max,Subj,B0} = 2,0^\circ/\text{s}$ und $\Delta a_{y,\max,Subj,B0} = 1,1 \text{ m/s}^2$ fallen somit bei Hochgeschwindigkeit (180 km/h) im Gegensatz deutlich konservativer als die objektiven Akzeptanzgrenzen aus.

In Summe kann durch die vorgestellte konservative Methode eine objektive Akzeptanzgrenze zur Absicherung eines objektiv für den Großteil der Normalfahrer beherrschbaren Fahrzeugverhaltens im Geschwindigkeitsbereich von 80-120 km/h zwischen ca. $\Delta \dot{\psi}_{\max,Grenze} = 7\text{-}8^\circ/\text{s}$ angegeben werden. Bei erhöhter Fahrgeschwindigkeit ist nach dem verwendeten B1-Beherrschbarkeitskriterium von einer minimalen Reduzierung der tolerierbaren Giergeschwindigkeitsabweichung auf ca. $\Delta \dot{\psi}_{\max,Grenze} = 6^\circ/\text{s}$ auszugehen, während eine konstante tolerierbare Querbeschleunigungsabweichung von ca. $\Delta a_{y,\max,Grenze} = 3 \text{ m/s}^2$ angegeben werden kann. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das Grundfahrzeugverhalten von weiteren Fahrzeugen der Klein-, Mittel- oder Oberklasse verschiedener Hersteller wird im Rahmen dieser Studie nicht untersucht und kann daher nicht belegt werden. Aufgrund der – trotz festgestellter Abweichungen der mittleren Kursabweichungen um mehr als 50 % oberhalb von $6^\circ/\text{s}$ Gierstörung – ähnlichen Resultate für die abgeleiteten Akzeptanzgrenzen am Fahrsimulator im Vergleich zu der durchgeführten Realstudie wird jedoch eine hohe Wahrscheinlichkeit für die Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Arbeit auf weitere im Markt befindliche Fahrzeuge vermutet.

6.1.3 Vergleich mit bisherigen Studien

Tabelle 6.2 vergleicht die in dieser Arbeit abgeleiteten objektiven Akzeptanzgrenzen für Hinterachs-Störaufschaltungen in Bremsmanövern mit den Ergebnissen der bereits bekannten Untersuchungen zur subjektiven Akzeptanz von Störaufschaltungen durch Überlagerungslenkung (AFS)⁴⁴² und durch Hinterradlenkeingriffe (HSR)⁴⁴³.

Tabelle 6.2 Vergleich der ermittelten Akzeptanzgrenzen mit anderen Studien zu Lenksystemstörungen

Genannte Akzeptanzgrenzen												
Fahrgeschwindigkeit:	50 km/h		80 kmh		100 km/h		120 km/h		150 km/h		180 km/h	
Kennwert:	$\Delta \dot{\psi}_{\max}$	$\Delta a_{y,\max}$	$\Delta \dot{\psi}_{\max}$	$\Delta a_{y,\max}$	$\Delta \dot{\psi}_{\max}$	$\Delta a_{y,\max}$	$\Delta \dot{\psi}_{\max}$	$\Delta a_{y,\max}$	$\Delta \dot{\psi}_{\max}$	$\Delta a_{y,\max}$	$\Delta \dot{\psi}_{\max}$	$\Delta a_{y,\max}$
Einheit:	°/s	m/s ²	°/s	m/s ²	°/s	m/s ²	°/s	m/s ²	°/s	m/s ²	°/s	m/s ²
Neukum/Krüger - VDA AK 2007												
Störung durch Überlagerungslenkung (AFS)	4,0	1,25	-	-	3,00	1,25	-	-	2,50	1,25	-	-
Wesp 2011												
Störung durch Hinterradlenkeingriffe (HSR)	-	-	-	-	12,00	2,80	-	-	7,80	3,00	-	-
Eigene Studie (R: Real; S:Simulator)												
Störung durch HSR in Bremsmanövern	-	-	7,7 ^R	3,2 ^R	-	-	7,9 ^R	3,9 ^R	-	-	6,0 ^S	3,2 ^S

Beide der genannten Studien nutzen das 85 %-Quantil der subjektiven Störbeurteilung für die Ableitung von Akzeptanzgrenzen. Die Ergebnisse der untersuchten AFS-Störungen sind erwartungsgemäß auch nach den Ergebnissen dieser Studie nicht auf die Beherrschbarkeit von Hinterachs-Störaufschaltungen in Bremsmanövern übertragbar, siehe Vergleich der einzelnen subjektiven Beurteilungen bei vergleichbaren Fahrgeschwindigkeiten aus Bild 6.2 (links). Die Ursache besteht in den bereits in Kapitel 2.2.1 diskutierten schreckhaften Reaktionen von Fahrern auf spürbare Störungen in der Vorderachs-Lenkung, die zu einer Überkompensation der auftretenden Störungen durch starke Lenkradkorrekturen führen.⁴⁴⁴

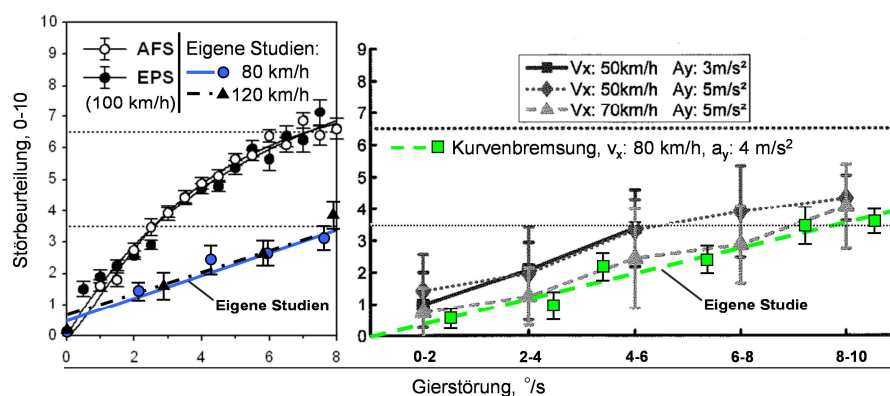


Bild 6.2 Vergleich der Störbeurteilungen in Geradeaus- und Kurvenbremsung mit den bisherigen Studien zur subjektiven Beherrschbarkeit von Lenksystemstörungen bei Neukum et al.⁴⁴⁵ und Schmidt et al.⁴⁴⁶

⁴⁴² Neukum et al. (2008): Controllability of superposition steering system failures, S. 11

⁴⁴³ Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

⁴⁴⁴ Wallentowitz et al. (2002): Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung

⁴⁴⁵ Neukum (2010): Controllability of erroneous steering torque interventions, S. 374

Die subjektive Störbeurteilung von Fahrwerkeingriffen, die nicht in die Lenkung des Fahrers eingreifen, scheint nach dem Vergleich der mittleren Subjektivurteile in Kurvenbremsung aus 80 km/h mit der Beurteilung von Vertikaldynamikstörungen aus Bild 6.2 (rechts) annähernd vergleichbar zu sein. Dementsprechend zeigt auch der Vergleich mit den von Wesp für Hinterradaufschaltungen ohne Bremseingriffe ermittelten subjektiven Akzeptanzgrenzen ähnlichere Ergebnisse:⁴⁴⁷ In den durchgeführten Geradeausbremsung aus 80 km/h und 120 km/h (eigene Studie) würden nach einem zu Wesp identischen Subjektivkriterium (85 %-Quantil der Subjektivbeurteilung, d.h. > 15 % Beurteilungen als „gefährlich“) auch in dieser Studie deutlich höhere und weniger konservative subjektive Akzeptanzgrenzen für die Open-Loop-Gierstörungen von $\Delta\dot{\psi}_{\max, \text{Subj}, 85\%} = 11,3^\circ/\text{s}$ (80 km/h) und $12,8^\circ/\text{s}$ (120 km/h) sowie $\Delta a_{y, \max, \text{Subj}, 85\%} = 4,3 \text{ m/s}^2$ (80 km/h) und $6,4 \text{ m/s}^2$ (120 km/h) ermittelt. Bei Störaufschaltungen in Fahrten mit 100 km/h wird durch Wesp eine vergleichbare Akzeptanzgrenze von $\Delta\dot{\psi}_{\max, \text{Subj}, 85\%} = 12,0^\circ/\text{s}$ angegeben. Die dabei auftretende Querschleunigungsabweichung $\Delta a_{y, \max}$ ist bei einer vergleichbaren Gierstörung jedoch deutlich größer als die Querschleunigungen des in dieser Arbeit eingesetzten Versuchsfahrzeugs. Dies spricht für ein deutlich voneinander abweichendes Fahrverhalten der verwendeten Testfahrzeuge und gleichzeitig für eine bessere Übertragbarkeit der subjektiven Beherrschbarkeit zwischen verschiedenen Fahrzeugen anhand der Giergeschwindigkeitsabweichung $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ als objektivem Bewegungskennwert. Bei Störaufschaltung in Fahrten mit 150 km/h werden von Wesp vergleichbare Giergeschwindigkeits- und Querschleunigungsabweichungen als subjektive Akzeptanzgrenzen genannt ($\Delta\dot{\psi}_{\max, \text{Subj}, 85\%} = 7,8^\circ/\text{s}$, $\Delta a_{y, \max, \text{Subj}, 85\%} = 3,0 \text{ m/s}^2$). Eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit wirkt sich in den Untersuchungen von Wesp also ebenfalls deutlich auf eine Erhöhung der Störbeurteilung von Normalfahrern aus. In den Geradeausbremsungen aus 180 km/h werden auch in dieser Arbeit selbst auf Basis des 85 %-Quantils der Subjektivbeurteilung im Vergleich mit den objektiven Akzeptanzgrenzen konservative $\Delta\dot{\psi}_{\max, \text{Subj}, 85\%} = 5^\circ/\text{s}$ und $\Delta a_{y, \max, \text{Subj}, 85\%} = 2,7 \text{ m/s}^2$ erzielt. Im niedrigen bis mittleren Fahrgeschwindigkeitsbereich scheint die in dieser Arbeit vorgestellte Ermittlung von Akzeptanzgrenzen auf Basis der 95 %-Vertrauensbereiche des Begrenzungsabstands und der C2 Beherrschbarkeit nach ISO 26262-3 im Vergleich mit der bekannten Studie zu Hinterrad-Störaufschaltungen das deutlich konservativere Kriterium zu sein. Erst ab Fahrgeschwindigkeiten $\geq 150 \text{ km/h}$ zeigt auch das subjektive Kriterium der 85 %-Quantilen einen direkteren Bezug zu der erzielten objektiven Beherrschbarkeit.

⁴⁴⁶ Schmidt et al. (2006): Fahrer- Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, S. 80

⁴⁴⁷ Wesp (2011): Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung, S. 112

6.2 Akzeptanzgrenzen für Schwimmwinkel im Ausweichtest

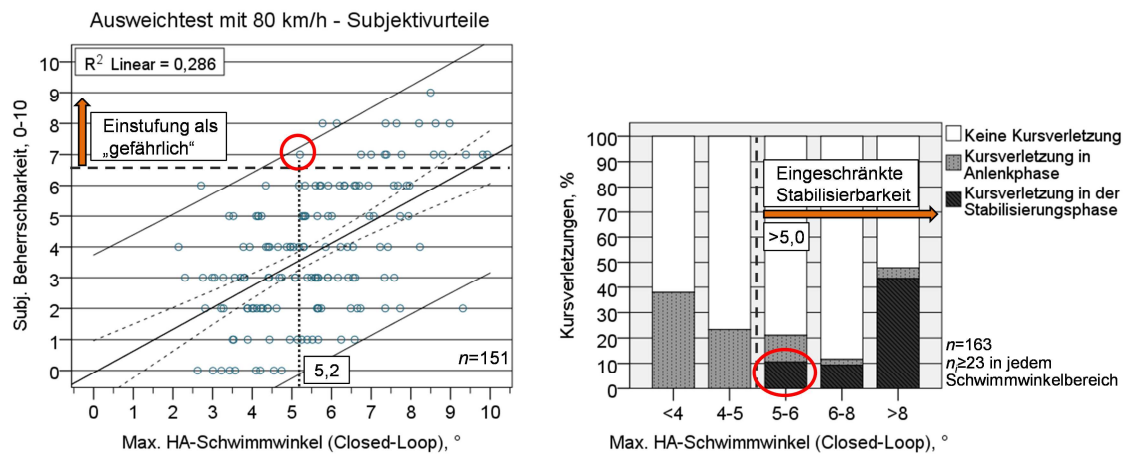


Bild 6.3 Subjektive und objektive Akzeptanzgrenze des HA-Schwimmwinkels in Ausweichtests mit 80 km/h

Im Gegensatz zu den untersuchten Hinterachs-Störaufschaltungen in Bremsmanövern erfolgt in Ausweichtests keine Darstellung der erzielten Beherrschbarkeit oder der erzielten Subjektivurteile über festen Open-Loop-Bewegungskennwerten. Das Kurshaltevermögen und die subjektive Beherrschbarkeit zeigen stattdessen einen stärkeren und plausiblen Zusammenhang mit den im Closed-Loop auftretenden maximalen Schwimmwinkeln. Um statistisch belastbare Aussagen für eine mögliche Akzeptanzgrenze der Schwimmwinkel ableiten zu können, wurden die Anteile der aufgetretenen Kursverletzungen in Kapitel 5.5 über fünf annähernd gleichverteilte Kategorien der erzielten maximalen Closed-Loop-Hinterachs-Schwimmwinkel aufgetragen, siehe Bild 6.3 (rechts). Während Kursverletzungen in der Anlenkphase auf zögerliche Lenkeingaben des Fahrers bzw. einer zu geringen Reaktion des Fahrzeugs auf die Lenkbefehle des Fahrers zurückzuführen sind, ist aus dieser Darstellung ersichtlich, dass erste Fahrer ab Schwimmwinkeln von $\beta_{HA,max} = 5-6^\circ$ erstmals nicht mehr in der Lage sind, das Fahrzeug nach dem Ausweichvorgang korrekt innerhalb des vorgegebenen Fahrstreifens zu stabilisieren. Der Kausalzusammenhang zwischen einer eingeschränkten Kurshaltung und den auftretenden HA-Schwimmwinkeln kann jedoch nur vermutet werden. Daher wird zusätzlich ein Vergleich mit ersten Einschränkungen der subjektiven Beherrschbarkeit gewählt: Erste Subjektivurteile der Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens in der Kategorie „gefährlich“ treten hierbei nach Bild 6.3 (links) ebenfalls ab ca. $\beta_{HA,max} = 5,2^\circ$ auf und liegen zwischen $\beta_{HA,max} = 5-6^\circ$ bei einem mit den Kursverletzungen in der Stabilisierungsphase vergleichbaren Anteil von ca. 10 %. In dieser Studie kann also auf Basis der subjektiven und objektiven Beherrschbarkeit eine Akzeptanzgrenze von ca. $\beta_{HA,max,Grenze} \leq 5^\circ$ vorgeschlagen werden, innerhalb der das Fahrzeug durch alle Fahrer sowohl subjektiv als auch objektiv sicher zu stabilisieren ist. Diese Akzeptanzgrenze

entspricht nach Kapitel 5.5.2 Schwimmwinkeln im Fzg.-Schwerpunkt von $\beta_{SP,max,Grenze} \leq 3,7^\circ$. Dieser Wert liegt in einem Bereich, der auch von Jürgensohn⁴⁴⁸ als noch nicht „unangenehm“ eingestuft wird ($< 4^\circ$) und unterhalb der genannten Grenze von $\beta_{SP,max} = 5^\circ$, ab der nach Keinert⁴⁴⁹ ein „kritisch zu beherrschendes“ Fahrverhalten vorliegt.

Bei der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Basis des Schwimmwinkels im Fzg.-Schwerpunkt ist aufgrund des in Kapitel 2.2.2 diskutierten, nicht eindeutigen Zusammenhangs zum Fahrzustand jedoch besondere Vorsicht geboten. Auch die Übertragbarkeit der ermittelten Akzeptanzgrenze für den HA-Schwimmwinkel auf andere Fahrzeuge und abweichende Fahrgeschwindigkeiten in Ausweichtests wird in dieser Arbeit nicht untersucht und kann somit auf Basis der gewählten Stichprobe bei 80 km/h zunächst nicht angenommen werden.

6.3 Bedeutung der Ergebnisse und Ausblick

Die ermittelten Akzeptanzgrenzen für die Bewegungskenngrößen des Grundfahrzeugverhaltens in Bremsmanövern infolge von Hinterachs-Störaufschaltungen repräsentieren den Bereich einer nachgewiesenen objektiv sicheren Kursführbarkeit des Fahrzeugs durch Normalfahrer. Hieraus ergibt sich eine Relevanz für die Absicherungsumfänge des Grundfahrzeugverhaltens in allen Testverfahren, die das Fahrzeugverhalten objektiv auf Basis von Giergeschwindigkeits- oder Querbeschleunigungsabweichungen im Vergleich zu einem stationären Ausgangszustand bewerten. Dies sind insbesondere die standardisierten Testverfahren

- Geradeausbremsung und μ -Split Bremsung (ISO 14512)
- Kurvenbremsung (ISO 7975) und Lastwechsel in der Kurve (ISO 9816).

Unter der Annahme einer Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den durchgeführten Geradeausbremsungen aus 80-180 km/h und Kurvenbremsungen aus 80 km/h auf die Beherrschbarkeit des Grundfahrzeugverhaltens kann das Fahrverhalten eines Fahrzeugs auf Basis der ermittelten Akzeptanzgrenzen auch in standardisierten Open-Loop-Tests ohne Fahrereinfluss abgesichert werden. Als maximal tolerierbare Werte für die maximalen Open-Loop-Giergeschwindigkeitsabweichungen können $\Delta\dot{\psi}_{max,Grenze} = 7-8^\circ/s$ (80-120 km/h) und $\Delta\dot{\psi}_{max,Grenze} = 6^\circ/s$ (bis 180 km/h) empfohlen werden. Die maximale Querbeschleunigungsabweichung sollte ca. $\Delta a_{y,Grenze} = 3m/s^2$ nicht überschreiten. Aus der Literatur ist bekannt, dass ein Teil der am Markt befindlichen Fahrzeuge einzelner Fahrzeughersteller deutlich höhere Giergeschwindigkeitsabweichungen aufweisen (\geq

⁴⁴⁸ Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, S. 14

10°/s), als zur Gewährleistung eines objektiv sicheren Kurshaltevermögens durch Normalfahrer in dieser Arbeit empfohlen werden können.⁴⁵⁰ Hier kann ein weiteres Potential zur Verbesserung der Fahrsicherheit durch Berücksichtigung der vorgestellten Akzeptanzgrenzen vermutet werden. Speziell in Kurvenbremsung kann durch eine optimierte Bremskraftverteilung das in die Kurve eindrehende Moment und somit auch die Giergeschwindigkeitsabweichung theoretisch vollständig vermieden werden, siehe Ergebnisse von Opelka.⁴⁵¹ In anderen Testmanövern, z.B. der μ -Split Bremsung, besteht hingegen ein Zielkonflikt zwischen der gewünschten Längsverzögerung und dem auftretenden Giermoment infolge der Kraftdifferenz auf der μ -high und μ -low Seite. Das Ziel neuer Fahrwerksentwicklungen ist hierbei die Erhöhung der „Sicherheitsreserve“ bei einer gleichzeitigen Verbesserung der Fahrperformance, z.B. durch den Einsatz einer Überlagerungslenkung.⁴⁵² Hier können die ermittelten Akzeptanzgrenzen eingesetzt werden, um das fahrdynamische Potential unter Einhaltung der Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens durch Normalfahrer bis hin zu der unter dieser Randbedingung maximal erzielbaren Fahrperformance zu erhöhen und hierdurch ebenfalls die Fahrsicherheit des Fahrzeugs zu erhöhen. Eine absolute Übertragbarkeit der nachgewiesenen Grenzen des objektiven Kurshaltevermögens in Abhängigkeit der objektiven Fahreigenschaften auf andere Fahrzeuge wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht belegt. Eine sinnvolle Erweiterung dieser Arbeit stellt also die Untersuchung von Giergeschwindigkeits- und Querschleunigungsabweichungen für verschiedene Fahrzeugtypen der Kompakt-, Mittel- und Oberklasse oder auch SUVs nach der vorgestellten Bewertungsmethodik dar. Als Ergebnis dieser erweiterten Untersuchung könnte die Allgemeingültigkeit der beschriebenen Zusammenhänge des objektiven Fahrzeugverhaltens im Open-Loop mit der Beherrschbarkeit durch Normalfahrer im Closed-Loop weiter in Richtung einer allgemeingültigen Aussage präzisiert werden.

Die Betrachtung des objektiven Kurshaltevermögens in Ausweichtests belegt exemplarisch, dass auf Basis einer objektiven Betrachtung der erzielten Fahrsicherheit auch in dynamischen Lenkmanövern nachvollziehbare Akzeptanzgrenzen für die im Closed-Loop auftretenden maximalen Schwimmwinkel abgeleitet werden können. Diese Grenzwerte können für die Auslegung von elektronischen Fahrwerksregelsystemen (z.B. ESP, AFS oder HSR) verwendet werden. Hierzu wird jedoch eine Erweiterung dieser Stichprobe auf die Beherrschbarkeit von Ausweichtests im höheren Geschwindigkeitsbereich (> 80 km/h) und von anderen Fahrzeugtypen empfohlen, um den ermittelten Anhaltswert von $\beta_{HA,max,Grenze} = 5^\circ$ zu verifizieren.

⁴⁴⁹ Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

⁴⁵⁰ Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, S. 609

⁴⁵¹ Opelka (2011): Simulationsbasierte Optimierung von ESP-Eingriffen, S. 108f

⁴⁵² Thies et al. (2009): Funktionales Zusammenspiel von Fahrwerk und Antrieb

7 Zusammenfassung

Die Beschreibung des Fahrzeugverhaltens durch charakteristische Bewegungskennwerte in standardisierten Testmanövern entspricht heute dem Stand der Technik bei den OEMs. Für eine vollständige Absicherungsaussage werden jedoch zusätzlich objektive Akzeptanzgrenzen dieser Bewegungskennwerte benötigt. Die bekannten Ansätze zur Ableitung von Akzeptanzgrenzen basieren ausschließlich auf der Subjektivbeurteilung durch Experten oder Normalfahrer und können somit keinen objektiven Beleg der sicheren Kursführbarkeit eines Fahrzeugs durch Normalfahrer erbringen. In dieser Arbeit werden das objektive Kursführungsvermögen von Normalfahrern in Brems- und Ausweichtests untersucht und auf Basis von objektiven Beurteilungskriterien Akzeptanzgrenzen für die charakteristischen Bewegungskennwerte ermittelt.

Die Giergeschwindigkeitsabweichung (Gierstörung) eine Sekunde nach Bremsbeginn $\Delta\dot{\psi}_{1s}$ oder ihr Maximalwert $\Delta\dot{\psi}_{\max}$ sind nach bekannten Studien und Veröffentlichungen geeignete Kennwerte zur Beschreibung der subjektiven Beherrschbarkeit in Bremsmanövern. In Fahrmanövern mit dynamischer Lenkanregung wird überwiegend auf hohe Schwimmwinkel als Kriterium für die erzielte Fahrsicherheit verwiesen. Bekannte Grenzwertaussagen zu subjektiv tolerierbaren Gierstörungsmaxima sind uneinheitlich und betragen zwischen 2,5°/s und 12°/s. Kritische Schwimmwinkel im Schwerpunkt des Fahrzeugs werden ebenfalls uneinheitlich zwischen 5-20° angenommen.

In einer Real- und Fahrsimulatorstudie mit jeweils ca. 100 Normalfahrern wird das Kurshaltevermögen in Geradeausbremsungen aus 80-180 km/h, Kurvenbremsung aus 80 km/h und einem Ausweichtest mit 80 km/h untersucht. Die charakteristische Open-Loop-Gierstörung wird in Bremsmanövern durch eine an die Bremsbetätigung gekoppelte Hinterradverstellung bis hin zu ca. 16°/s stimuliert. Mittels Hinterradverstellung werden in Ausweichtests zudem hohe Schwimmwinkel erzeugt. Geprüft wird, ob die Probanden das Fahrzeug innerhalb der Pylonen-markierten Fahrgassen sicher stabilisieren können. Der Kursverlauf und die Bewegungskennwerte des Fahrzeugs werden über hochpräzise Inertial- und Differential-GPS-Messtechnik erfasst.

Die mittlere Kursabweichung steigt über dem Betrag der Gierstörungen erwartungsgemäß in allen Bremsmanövern progressiv an. Entsprechend werden progressiv absinkende mittlere Abstände von der Fahrstreifenbegrenzung beobachtet. Das Kurshaltevermögen ist bei konstanter Ausgangsfahrgeschwindigkeit hingegen unabhängig vom Zeitverzug des Auftretens einer Gierstörung ab Störbeginn. Ebenso ist es für das erzielte Kurshaltevermögen in Geradeausfahrt mit 80 km/h unerheblich, ob eine Gierstörung an die Bremsung gekoppelt oder für den Fahrer überraschend aufgeschaltet wird. Bei einer Erhöhung der Ausgangsfahrgeschwindigkeit von 120 auf 180 km/h können bei identischen

Gierstörungen um ca. 36 % höhere mittlere Kursabweichungen und deutlich absinkende mittlere Begrenzungsabstände nachgewiesen werden. In Kurvenbremsung ist das Kurshaltevermögen der Probanden hingegen bereits in ungestörter Fahrt eingeschränkt und es kommt in ca. 26 % der Fahrten zu Fahrstreifenverletzungen.

Die Ableitung von Akzeptanzgrenzen erfolgt in den Bremsmanövern auf Basis der 95 %-Erwartungsbereiche des minimalen Begrenzungsabstands und der zusätzlichen Prüfung einer Beherrschbarkeitswahrscheinlichkeit ≥ 90 % nach ISO 26262-3. In Geradeaus- und Kurvenbremsungen aus 80-120 km/h kann für Real- und Fahrsimulatorstudie eine Akzeptanzgrenze der maximalen Giergeschwindigkeitsabweichung von ca. $\Delta\dot{\psi}_{\max, \text{Grenze}} \simeq 7\text{-}8^\circ/\text{s}$ abgeleitet werden. Bei Geradeausbremsung aus 180 km/h liegt die Grenze des Nachweises einer objektiv sicheren Kursführung durch die Normalfahrer bei verminderten $\Delta\dot{\psi}_{\max, \text{Grenze}} = 6^\circ/\text{s}$. Die ermittelte Akzeptanzgrenze für die zugehörigen Querbeschleunigungsabweichungen ist in dieser Studie mit $\Delta a_{y, \text{Grenze}} = 3 \text{ m/s}^2$ über der Fahrgeschwindigkeit konstant. In Ausweichtests aus 80 km/h treten im Bereich von Hinterachs-Schwimmwinkeln zwischen $5\text{-}6^\circ$ erstmals Kursverletzungen in der Stabilisierungsphase auf. Eine objektiv sichere Kursführung kann daher nur bis hin zu maximalen Schwimmwinkeln von $\beta_{HA, \max, \text{Grenze}} = 5^\circ$ nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit verknüpfen die in standardisierten Testverfahren ermittelten Open-Loop-Kennwerte des Fahrzeugverhaltens in Bremsmanövern mit dem Nachweis einer objektiv sicheren Kursführbarkeit durch Normalfahrer. Die daraus abgeleiteten Akzeptanzgrenzen leisten somit einen Beitrag dazu, die bisher bestehende Lücke zwischen dem bekannten objektiven Fahrzeugverhalten und der abzusichernden Beherrschbarkeit von Kraftfahrzeugen durch Normalfahrer im geschlossenen Regelkreis weiter zu verringern.

8 Anhang

8.1 Erwartungsbereiche der Begrenzungsabstände

8.1.1 Auftragung über der Open-Loop-Gierstörung

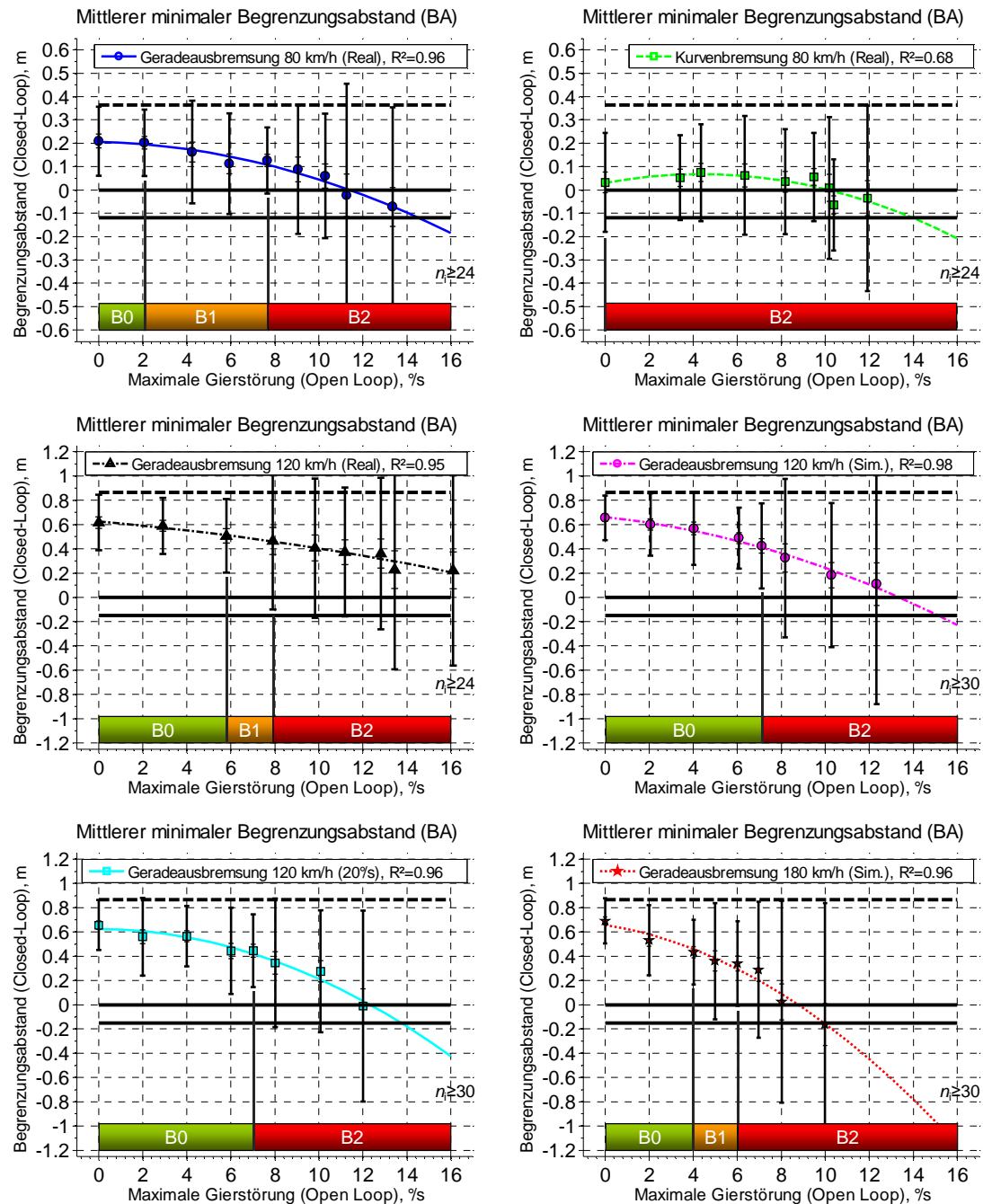


Bild 8.1 95 Mittelwerte und 95 %-Erwartungsbereiche des minimalen Begrenzungsabstandes über der maximalen Open-Loop-Giergeschwindigkeitsabweichung (Gierstörung) in den durchgeführten Bremsmanövern

8.1.2 Auftragung über der Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung

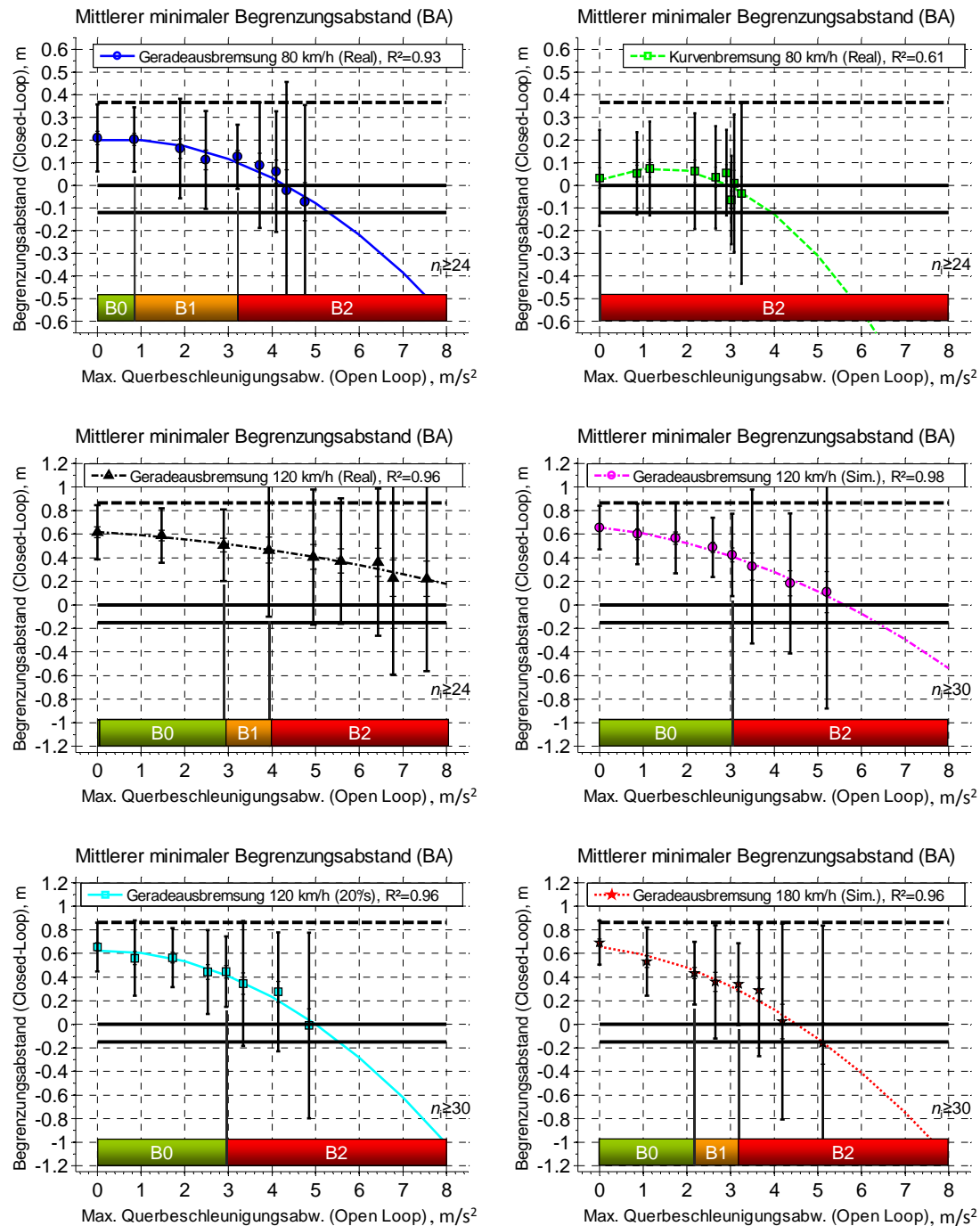


Bild 8.2 Mittelwerte und 95 %-Erwartungsbereiche des minimalen Brenzungsabstandes über der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung in den durchgeführten Bremsmanövern

8.2 Erwartungsbereiche der Subjektivbeurteilung

8.2.1 Auftragung über der Open-Loop-Gierstörung

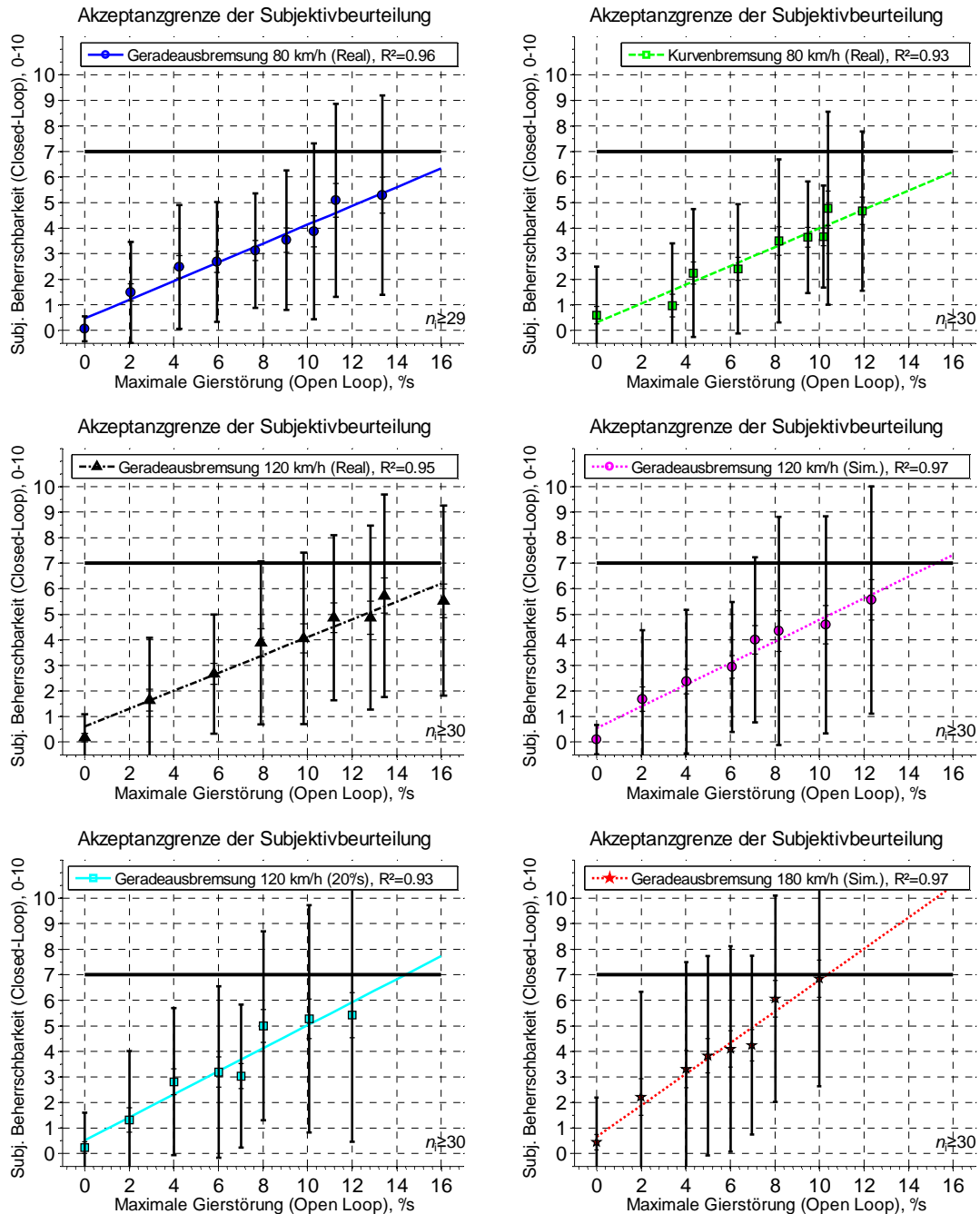


Bild 8.3 Mittelwerte und 95 %-Erwartungsbereiche der Subjektivbeurteilung über der maximalen Open-Loop-Giergeschwindigkeitsabweichung (Gierstörung) in den durchgeführten Bremsmanövern

8.2.2 Auftragung über der Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung

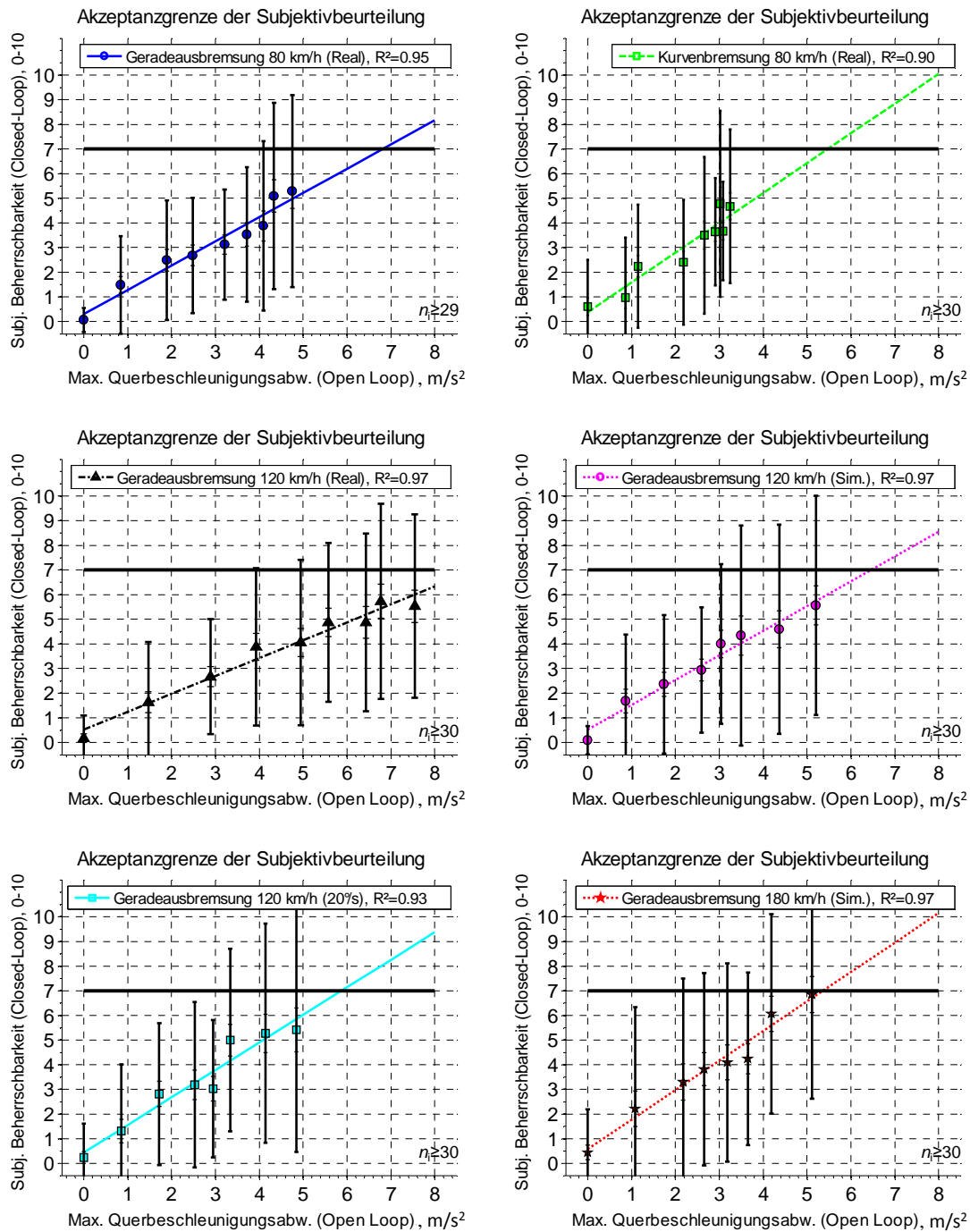


Bild 8.4 Mittelwerte und 95 %-Erwartungsbereiche der Subjektivbeurteilung über der maximalen Open-Loop-Querbeschleunigungsabweichung in den durchgeführten Bremsmanövern

8.3 Standardisierte Testverfahren

Dieser Abschnitt beschreibt in Ergänzung von Kapitel 2.2 die Durchführung und die bekannten Bewegungskennwerte zur Beschreibung des Fahrzeugverhaltens in den standardisierten Testverfahren. Diese Zusammenfassung basiert insbesondere auf den umfangreichen Darstellungen der aktuellen Testverfahren und Bewertungskriterien von Zomotor et al.⁴⁵³ (1997-1998) und Dietrich⁴⁵⁴ (Diplomarbeit 2009) und beschränkt sich auf diejenigen Testmanöver, die zur Beurteilung der Stabilität bzw. Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens angewandt werden.

8.3.1 Geradeausverhalten

Im Bereich des Geradeausverhaltens wird das Fahrverhalten infolge Bremsung (μ -Split), leichten Lenkanregungen mit geringen Querschleunigungen (Gespannstabilität, Lenkungspendeln, Weavetest) und äußeren Störeinflüssen (Seitenwind) bewertet. Zur Bewertung der Fahrstabilität wird von Zomotor et al. insbesondere auf die Testmanöver *μ -Split Bremsung* und *Seitenwindempfindlichkeit* eingegangen.

1. Geradeausbremsung auf μ -Split (ISO 14512)

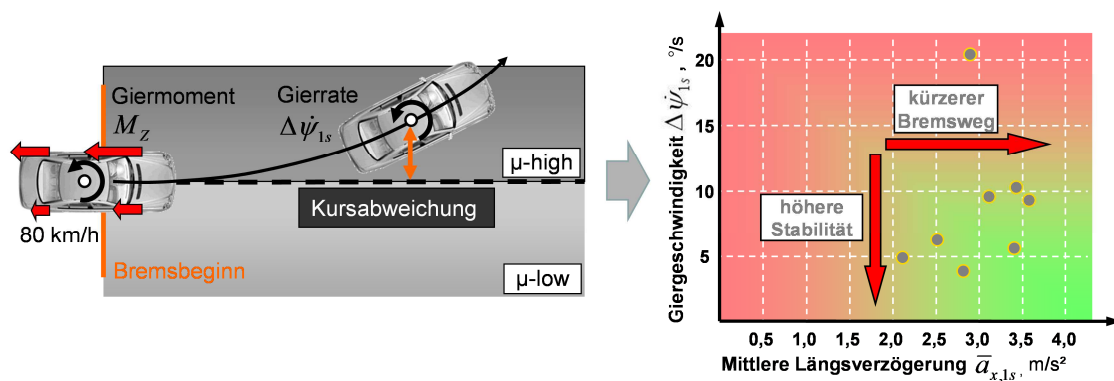


Bild 8.5 Durchführung und Auswertung der Geradeausbremsung auf μ -Split Bedingungen nach ISO 14512⁴⁵⁵

Auf winterlich glatten oder verunreinigten Fahrbahnen können inhomogene Reibwertverhältnisse auftreten. Die Bremsstabilität bei Geradeausbremsung auf gemischten Reibwerten wird in dem Standardmanöver μ -Split Bremsung nach Bild 8.5 und der 1999 eingeführten ISO 14512 geprüft. In diesem Manöver wird das Fahrzeug auf einer einseitig glatten Fahrbahn aus 80 km/h mit maximalem Pedaldruck verzögert. Durch die Reibwertdifferenz zwischen μ -high und μ -low Seite können die Räder des Fahrzeugs unterschiedliche hohe Längskräfte absetzen. Aus der Summen-Kraftdifferenz ΔF_x zwi-

⁴⁵³ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁴⁵⁴ Dietrich (2009): Entwicklung eines Versuchskonzepts zur Bewertung von Stabilisierungsfähigkeiten

schen beiden Fahrzeugseiten und der Spurbreite s_b resultiert das Giermoment um die Hochachse des Fahrzeugs zu

$$M_z = \Delta F_x \cdot \frac{s_b}{2}, \quad (5.2)$$

in deren Folge das Fahrzeug in Richtung μ -high Seite eindreht. Die Bremskräfte der Räder auf der μ -high Seite werden heute durch Schlupfregelsysteme begrenzt, um die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs aufrecht zu erhalten. Zusätzlich können stabilisierende Eingriffe durch aktive Lenksysteme erfolgen.^{456,457}

Die μ -Split Bremsung kann sowohl in Open-Loop (fixed control) als auch Closed-Loop-Durchführung erfolgen. Die ISO Norm empfiehlt die Betrachtung der mittleren Längsverzögerung $\bar{a}_{x,1s}$ über die Dauer einer Sekunde nach Bremsbeginn

$$\bar{a}_{x,1s} = \frac{(v_0 - v_{1s})}{1s} \quad (5.3)$$

als Maß für das Verzögerungsvermögen sowie die Betrachtung der resultierenden Giergeschwindigkeit eine Sekunde nach Bremsbeginn als Maß für die Stabilität bzw. Beherrschbarkeit des Fahrzeugs.

$$\Delta\dot{\psi}_{1s} = \frac{1}{0,2s} \cdot \int_{0,9s}^{1,1s} \psi(t) dt \quad (5.4)$$

Aus (5.2) ist ersichtlich, dass bei einer Bremsung auf gemischten Reibwerten ein Zielkonflikt zwischen einer möglichst hohen Längsverzögerung und einer möglichst niedrigen Giergeschwindigkeitsabweichung besteht. Eine hohe mittlere Längsverzögerung ist nur durch verstärktes Abbremsen der Räder auf der μ -high Seite möglich, wodurch das Giermoment und somit auch die Giergeschwindigkeitsabweichung ansteigen. Ziel ist eine möglichst hohe Längsverzögerung bei einer vorhersehbaren und „müheles“ beherrschbaren Gierreaktion des Fahrzeugs.⁴⁵⁸ Zur Bewertung der Fahrstabilität kann nach Heißing/Brandl zusätzlich die seitliche Kursabweichung herangezogen werden. Trotz der etablierten Gegenüberstellung von Giergeschwindigkeitsabweichung und Bremsvermögen wurden bisher keine Akzeptanzgrenzen hinsichtlich der erzielten Fahrsicherheit für das Gierverhalten des Fahrzeugs in μ -split Bremsung veröffentlicht.

⁴⁵⁵ ISO 14512 (1999): Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction

⁴⁵⁶ Lugner, Plöchl (1995): Additional 4WS and Driver Interaction, S. 639ff

⁴⁵⁷ Thies et al. (2009): Funktionales Zusammenspiel von Fahrwerk und Antrieb

⁴⁵⁸ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

2. Geradeausbremsung und Lastwechselverhalten

Neben gemischten Reibwertverhältnissen können auch schiefziehende Bremsen, Fahrwerkeinflüsse oder Fahrbahnunebenheiten eine Störung des Geradeausverhaltens bei Lastwechsel- oder Bremsmanövern verursachen.^{459,460} Die objektive Beurteilung des resultierenden Fahrverhaltens erfolgt nach Zomotor et al. vergleichbar zur Beurteilung des Fahrverhaltens in μ -Split Bremsung. Auch hier haben sich die Bewegungskenngrößen zum Zeitpunkt eine Sekunde nach Bremsbeginn oder Lastwechsel als Beurteilungskriterien bewährt.^{461,462} Neben den Momentanwerten der Bewegungsgrößen nach einer Sekunde werden teilweise auch Momentanwerte nach einer halben Sekunde oder die Maximalwerte der Bewegungsgrößen als Kenngrößen für das Fahrverhalten verwendet.⁴⁶³ Bei Closed-Loop-Durchführung wird nach den von Zomotor et al. zitierten Quellen zusätzlich die zur Kurshaltung benötigte Lenkaktivität betrachtet.^{464,465,466}

3. Seitenwindempfindlichkeit (ISO 12021-1)

Das Fahrverhalten infolge Seitenwind wird in reproduzierbarer Vorbeifahrt an einer stationären Seitenwindanlage geprüft. Untersuchungen bei natürlichem Seitenwind haben sich aufgrund der eingeschränkten Reproduzierbarkeit nicht bewährt.⁴⁶⁷ Der Windvektor greift während der Vorbeifahrt am Seitenwindgebläse im sogenannten Druckpunkt des Fahrzeugs an und erzeugt durch den Längs- und Vertikalabstand des Druckpunkts vom Fahrzeugschwerpunkt ein Gier- und Wankmoment.⁴⁶⁸ Die Vorbeifahrt erfolgt nach ISO 12021-1⁴⁶⁹ mit einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h bei einer mittleren Seitenwindgeschwindigkeit von 20 m/s und einer Mindestlänge der Windgeneratorstrecke von 15 m. Das Seitenwindmanöver wird bevorzugt im Open-Loop mit fixiertem Lenkrad durchgeführt. Ebenfalls bekannt ist die Durchführung dieses Testmanövers im Closed-Loop, wobei der Fahrer versucht, das Fahrzeug auf dem Ausgangskurs zu stabilisieren.⁴⁷⁰

Zur objektiven Bewertung des Seitenwindverhaltens sind in ISO 12021-1 und bei Zomotor et al. insbesondere der zeitliche Verlauf der Giergeschwindigkeit und der Querbeseleunigung angeführt. Neben der Verwendung von Maximalwerten wird in der ISO-

⁴⁵⁹ Mitschke, Niemann (1974): Regelkreis Fahrer-Fahrzeug bei Störung durch schiefziehende Bremsen

⁴⁶⁰ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁴⁶¹ Kuralay (1986): Einfluss von Fahrwerkselastizitäten und Reifenparametern auf das Fahrverhalten

⁴⁶² Zomotor (1978): Meßverfahren bei der Auslegung des Fahrverhaltens

⁴⁶³ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁴⁶⁴ Grunow et al. (1983): Testverfahren für PKW mit automatischen Blockierverhinderern

⁴⁶⁵ Lorenz et al. (1986): Einfluß des Sperrdifferentials auf Traktion und Fahrverhalten

⁴⁶⁶ Rompe, Ehlich (1987): Stand der objektiven Bewertung von Reifen- und Fahrwerkseigenschaften

⁴⁶⁷ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁴⁶⁸ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

⁴⁶⁹ ISO 12021-1 (1996): Sensivity to lateral wind

Norm die Analyse von Impulswerten dieser Bewegungsgrößen vorgeschlagen. Der Impulswert ist als Mittelwert der Gier- oder Querschleunigungsreaktion innerhalb des Zeitraums definiert, in dem die jeweilige Bewegungsgröße einen größeren Wert als 50 % des auftretenden Maximalwerts annimmt. Zusätzlich kann die seitliche Kursabweichung des Fahrzeugs bei konstantem Lenkradwinkel als Beurteilungskennwert verwendet werden, siehe auch.⁴⁷¹ Nach Zomotor et al.^{472,473} korreliert der Anstieg der Giergeschwindigkeit signifikant mit der Subjektivbeurteilung von Testfahrern. Panhorst weist einen in den meisten Fällen eindeutigen Zusammenhang zwischen maximaler Giergeschwindigkeit und den zugehörigen Subjektivbeurteilungen nach.⁴⁷⁴ Bei geringen Seitenwindgeschwindigkeiten nennen Maeda et al. die Wankbeschleunigung als entscheidende Größe.⁴⁷⁵ Zusätzlich existieren Untersuchungen zu Kennwerten, die aus mehreren Bewegungsgrößen zusammengesetzt sind und so eine verbesserte Abbildung der Subjektivurteile erzielen.^{476,477,478} Nach Willumeit et al. (1986) wird das Seitenwindverhalten beispielsweise dann positiv bewertet, wenn die Effektivwerte von Gierwinkel, Giergeschwindigkeit und Querschleunigung klein sind, die Giergeschwindigkeit zu Beginn der Seitenwindeinfahrt jedoch schnell ansteigt.

8.3.2 Kurvenverhalten

Die Testverfahren zur Prüfung des Kurvenverhaltens beschreiben das Fahrverhalten in stationärer Kreisfahrt und infolge von Lastwechsel- oder Bremsreaktionen aus einer anfänglich stationären Kreisfahrt heraus. Das stationäre Übertragungsverhalten und die Fahrzeugreaktion während Kurvenbremsung sind nach von Glasner Bestandteil der nötigen Prüfprozeduren zur Definition von Mindestanforderungen an das Fahrverhalten.⁴⁷⁹

1. Stationäre Kreisfahrt (ISO 4138)

Die stationäre Kreisfahrt ist nach Zomotor et al. die älteste Methode zur Prüfung der Fahreigenschaften eines Fahrzeugs⁴⁸⁰ und wird zur Bestimmung des sogenannten Eigenlenkverhaltens verwendet, siehe Kapitel 2.1.2. Bereits Ende der 30er- / Anfang der 40er-Jahre wurde zur Beschreibung des Kurvenverhaltens eines Fahrzeugs der benötigte

⁴⁷⁰ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

⁴⁷¹ Scholz et al. (2008): Aktive Fahrwerkssysteme am Beispiel einer neuen Hinterachslenkung

⁴⁷² Zomotor (1978): Meßverfahren bei der Auslegung des Fahrverhaltens

⁴⁷³ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁴⁷⁴ Panhorst (2002): Objektive und Subjektive Beurteilung des Seitenwindverhaltens von PKW

⁴⁷⁵ Maeda et al. (1996): Aerodynamic Effects on the Vehicle Stability in High Speed Running

⁴⁷⁶ Panhorst (2002): Objektive und Subjektive Beurteilung des Seitenwindverhaltens von PKW

⁴⁷⁷ Willumeit et al. (1991): Korrelation von Untersuchungsergebnissen zur Seitenwindempfindlichkeit

⁴⁷⁸ Willumeit et al. (1986): Verfahren zur Korrelation von Fahrzeugverhalten und Fahrerbeurteilung bei Seitenwind

⁴⁷⁹ von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 12ff

⁴⁸⁰ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

Lenkradwinkel über der Querbeschleunigung aufgetragen.⁴⁸¹ 1982 sind die Vorschläge zur Durchführung der stationären Kreisfahrt in eine ISO-Norm⁴⁸² übernommen worden. Das Fahrverhalten in stationärer Kreisfahrt kann wie bereits beschrieben auf zwei verschiedene Arten erfolgen:

- Steigerung der Fahrgeschwindigkeit auf konstantem Kurvenradius von 40 m, siehe Bild 8.6
- Lenkungsziehen bei konstanter Fahrgeschwindigkeit

Aufgrund des geringeren Platzbedarfs empfiehlt die ISO-Norm eine Durchführung auf einem konstanten Kreisradius.

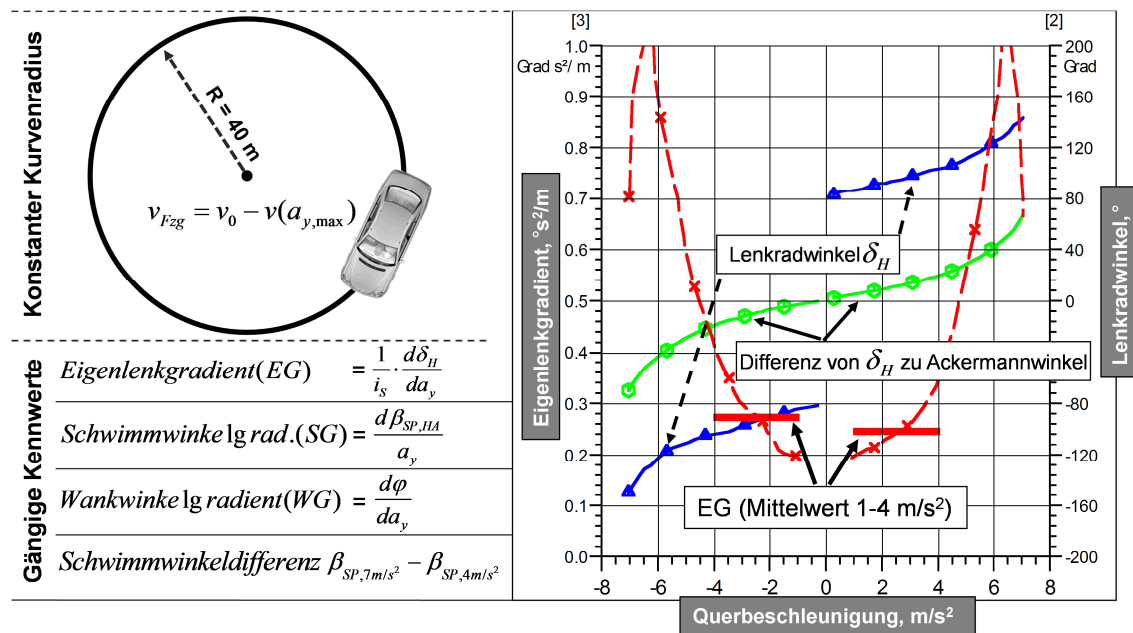


Bild 8.6 Durchführung der stationären Kreisfahrt auf konstantem Kurvenradius und gängige charakteristische Kenngrößen

Ausgehend von der Geschwindigkeit v_0 nahe Stillstand wird die Geschwindigkeit langsam bis zur Erreichung der maximal möglichen Querbeschleunigung $a_{y,max}$ gesteigert. Der benötigte Lenkradwinkel nahe des Stillstands ($a_y = 0 \text{ m/s}^2$) entspricht zunächst dem Ackermannwinkel δ_A und steigt bei einem untersteuernd ausgelegten Fahrzeug nach Bild 8.6 (rechts) mit erhöhter Querbeschleunigung kontinuierlich an. Als Kennwerte werden Lenkradwinkel δ_H , Schwimmwinkel $\beta_{SP,HA}$, Wankwinkel φ und Lenkradmoment

⁴⁸¹ Stonex (1941): Car Control Factors and their Measurement

⁴⁸² ISO 4138 (1982): Steady state circular test procedure

M_H als Funktion der Querbesehleunigung bzw. deren auf die Querbesehleunigung bezogenen Gradienten betrachtet. Der Lenkradwinkelgradient

$$\text{Lenkradwinkelgradient} = \frac{d\delta_H}{da_y} \quad (5.5)$$

ist bezogen auf die Lenkübersetzung i_s bei konstantem Kurvenradius und somit konstantem Ackermannwinkel auch als Eigenlenkgradient

$$EG = \frac{1}{i_s} \cdot \text{Lenkradwinkelgradient} \quad (5.6)$$

bekannt und ein Maß für das Unter- bzw. Übersteuerverhalten eines Fahrzeugs, siehe auch Kapitel 2.1.2. In den von Rompe/HeiBing 1984 zusammengefassten Kenngrößen zur Bewertung des stationären Kurvenverhaltens werden zusätzlich die Schräglaufwinkeldifferenz von Vorder- zu Hinterachse $\alpha_v - \alpha_h$, die Differenz von Lenkradwinkel zu Ackermannwinkel $\delta_H - \delta_A$, der Quotient aus Lenkradwinkel und Ackermannwinkel δ_H / δ_A sowie der Gierverstärkungsfaktor $GV = \dot{\psi} / \delta_H$ jeweils als Funktion der Querbesehleunigung betrachtet.⁴⁸³ Nach einer von Zomotor et al.⁴⁸⁴ angeführten aktuelleren Studie aus dem Jahr 1997 sind der Schwimmwinkelgradient im linearen Bereich bis ca. 4 m/s^2 Querbesehleunigung und die Schwimmwinkeldifferenz im nichtlinearen Bereich $\beta_{SP,7\text{m/s}^2} - \beta_{SP,4\text{m/s}^2}$ für einen Vergleich zwischen verschiedenen Fahrzeugen am besten geeignet.⁴⁸⁵ Auch nach den Zusammenfassungen von Zomotor et al.⁴⁸⁶ aus dem Jahr 1977 und von Horn⁴⁸⁷ 1985 wird dem Schwimmwinkel in stationärer Kreisfahrt ein deutlicher Einfluss auf die empfundene Fahrstabilität beigemessen. Niedrige Schwimmwinkel werden demnach als angenehmer beurteilt. Zwar sind die Kennwerte zur Objektivierung des Fahrverhaltens in stationärer Kreisfahrt allgemein anerkannt, dennoch existieren hinsichtlich der optimalen Gestaltung des Fahrverhaltens nur qualitative Vorstellungen: So ist nach Zomotor et al. beispielsweise der optimale Übergang in den Grenzbereich noch nicht geklärt.⁴⁸⁸ Ein möglichst linearer Zusammenhang zwischen Lenkradwinkel und Querbesehleunigung bis hin zu hohen Querbesehleunigungen steigert nach Donges/Wimberger⁴⁸⁹ die Beherrschbarkeit des Fahrzeugverhaltens, der Übergang in den Grenzbereich ($a_y > 7 \text{ m/s}^2$) sollte sich jedoch für ein subjektiv sicheres

⁴⁸³ Rompe, HeiBing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

⁴⁸⁴ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁴⁸⁵ Brunkow (1997): Ermittlung von Kennwerten zur objektiven Fahrzeugbeurteilung

⁴⁸⁶ Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁴⁸⁷ Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße, S. 22ff

⁴⁸⁸ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

Fahrempfinden durch eine spürbare Zunahme des Lenkradwinkelbedarfs ankündigen.⁴⁹⁰ Bezüglich der „Direktheit“ des Fahrverhaltens, ausgedrückt durch den auf die Querschleunigung bezogenen Lenkradwinkelbedarf, sollte das Fahrzeug nach Horn weder zu unhandlich noch zu empfindlich ausgelegt sein.⁴⁹¹ Es besteht Einigkeit darin, dass Fahrzeuge für eine Beherrschbarkeit durch Normalfahrer stationär untersteuernd ausgelegt sein müssen.^{492,493} Ein untersteuerndes Fahrverhalten bedeutet, dass die Querschleunigung bei konstanter Fahrgeschwindigkeit nur dann ansteigt, wenn der Fahrer zusätzlich in die Kurve einlenkt, siehe Kapitel 2.1.2.

2. Instationäre (durch Fahrbahnunebenheiten gestörte) Kreisfahrt

Eine erweiterte Bewertung der Fahrstabilität eines Fahrzeugs in Kurvenfahrt kann durch die Betrachtung des Fahrverhaltens infolge einer Störung durch Fahrbahnunebenheiten vorgenommen werden. Hierbei wird das Fahrzeug in einer zunächst stationären Kurvenfahrt über eine definierte Straßenunebenheit bewegt und die Fahrzeugreaktion messtechnisch erfasst. Dieses Manöver hat nach Zomotor et al.^{494,495} durch die Verbesserungen der Fahrwerke an Bedeutung verloren, weshalb nur wenige aktuelle Untersuchungen bekannt sind. Charakteristische Bewegungskennwerte sind nach Zomotor et al. (1997/1998) die normierte, auf die Ausgangsgierrate bezogene Giergeschwindigkeitsdifferenz und die absolute Gierreaktion. Hierbei werden insbesondere die Zeitwerte der Gierreaktion $\dot{\psi}_{1s}$ eine Sekunde nach Störungseintritt als geeignete Kennwerte genannt.

3. Bremsen in der Kurve (ISO 7975)

Das Testverfahren Bremsen in der Kurve wird aufgrund der Häufigkeit von Kurvenbremsungen im realen Straßenverkehr und des Bezugs zur Fahrsicherheit als eines der wichtigsten Testmanöver bezeichnet.^{496,497,498} Die Vorschläge zur Durchführung dieses Testmanövers wurden daher bereits 1985 in eine ISO-Norm⁴⁹⁹ überführt. Aus einer stationären Kreisfahrt heraus wird das Fahrzeug in der ersten Variante der ISO-Norm (1985) mit fixiertem Lenkrad (Open-Loop) aus folgenden Anfangsbedingungen abgebremst:

- Radius 30-50 m, Ausgangsquerbeschleunigung 5 m/s^2

⁴⁸⁹ Donges, Wimberger (1992): Performance of BMW's Active Rear-Axle Kinematics

⁴⁹⁰ Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

⁴⁹¹ Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße

⁴⁹² Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeug

⁴⁹³ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

⁴⁹⁴ Zomotor et al. (1977): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁴⁹⁵ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁴⁹⁶ von Glasner (2009): Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, S. 13

⁴⁹⁷ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁴⁹⁸ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

- Radius 100 m, Ausgangsquerbeschleunigung 4 m/s^2

In der aktuellen Fassung der Norm⁵⁰⁰ (2006) wird der Teststandard auf

- Radius 100 m, Ausgangsquerbeschleunigung 5 m/s^2

festgelegt.

Der Bremsdruck wird in mehreren Wiederholungsbremungen, beginnend bei einer mittleren Längsverzögerung a_x von 2 m/s^2 , mit der Schrittweite Δa_x von maximal 1 m/s^2 bis hin zum Erreichen der maximal möglichen Bremsverzögerung a_x gesteigert. Zusätzlich wird das Kurvenbremsverhalten durch die Fahrzeughersteller auch in weiteren Betriebspunkten untersucht, z.B. aus maximaler Ausgangsquerbeschleunigung oder in Form des Hochgeschwindigkeitskurvenbremsens aus Geschwindigkeiten $> 200 \text{ km/h}$.

Wie in 2.1.2 diskutiert wurde, summieren sich unter Vernachlässigung der Achskinematik folgende Effekte zu einem übersteuernd oder untersteuernd wirkenden zusätzlichen Giermoment um die Fahrzeughochachse M_z :

1. Radlastverschiebung von Hinter- zu Vorderachse und daraus resultierende Verringerung der Summenschräglauftsteifigkeit $c_{\alpha,h}$ an der Hinterachse bei gleichzeitiger Erhöhung der Summenschräglauftsteifigkeit $c_{\alpha,v}$ an der Vorderachse
2. Seitlich zur Karosserie versetzt angreifende Längskräfte aufgrund der unter Seitenkraft zur Kurveninnenseite hin verschobenen Aufstandsflächen der Reifen.
3. Reduzierung der Schräglauftsteifigkeiten aller vier Einzelräder durch kombinierte Schlupfbeanspruchung bei hohen Längsschlupfwerten
4. Ausprägung der radindividuellen Bremskraftverteilung an den vier Einzelrädern

Während die Radlastverschiebung zwischen Hinter- und Vorderachse und die Summe der seitlich versetzt angreifenden Längskräfte nur von der Intensität der Bremsung selbst abhängen, kann die Bremskraftverteilung achsweise oder radindividuell erfolgen. Bei achsweiser Bremskraftverteilung kann nach 2.1.2 eine Über- oder Untersteuerneigung des Fahrzeugs durch „Überbremsen“ von entweder Vorder- oder Hinterachse erzeugt werden. Bei niedrigen und mittleren Längsverzögerungen werden jedoch keine hohen Längsschlupfwerte erzielt, so dass die gebremsten Räder kaum an Seitenkraft einbüßen, siehe z.B. Reifenkennfeld bei Reimpell/Sponagel.⁵⁰¹ Bei achsweiser Bremskraftverteilung überwiegt somit bis hin zu mittleren Längsverzögerungen das Giermo-

⁴⁹⁹ ISO 7975 (1985): Braking in a turn – Open loop test procedure (first edition)

⁵⁰⁰ ISO 7975 (2006): Braking in a turn, Open-loop test method (third edition)

⁵⁰¹ Reimpell, Sponagel (1988): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage

ment $M_{Z, \text{Radlastverschiebung}}$ aus der Radlastverschiebung zwischen Vorder- und Hinterachse, welches das Fahrzeug bei Bremsung weiter in die Kurve eindreht.⁵⁰² Erst bei stärkerer Verzögerung bzw. einem tatsächlichen „Überbremsen“ der Räder an der Vorderachse wird die übertragbare Seitenkraft der Vorderräder reduziert und das Fahrzeugverhalten in Richtung Untersteuern verändert. Dementsprechend zeigen auch Fahrzeuge, die durch achsweise Bremskraftverteilung untersteuernd ausgelegt sind (verstärkte Bremsung an der Vorderachse), bis hin zu mittleren Verzögerungen ein tendenziell übersteuerndes Bremsverhalten, welches erst bei hohen Längsverzögerungen in ein untersteuerndes Fahrzeugverhalten übergeht.^{503,504} Ein vollständiges Blockieren der Räder wird bei heutigen Fahrzeugen durch das Bremsschlupfregelsystem ABS verhindert, so dass nach Donges/Rompe (1982) bei hohen Längsverzögerungen trotz Untersteuertendenz kein vollständiger Verlust der Lenkbarkeit auftritt.

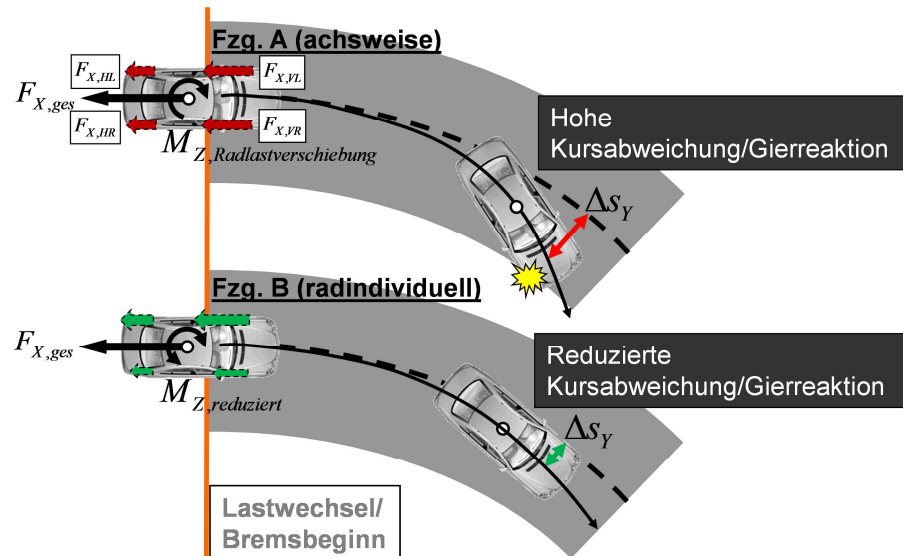


Bild 8.7 Gierreaktion und Kursabweichung bei Kurvenbremsung mit achsweiser Bremskraftverteilung (oben) und stabilisierender radindividueller Bremskraftverteilung (unten)

Im Gegensatz zu einer achsweisen Bremskraftverteilung kann das Giermoment mittels radindividueller Bremskraftverteilung auch bei niedrigen Radschlupfwerten beeinflusst werden. Durch stärkeres Abbremsen der kurvenäußeren Räder ist es theoretisch möglich, das durch die Radlastverschiebung zwischen Hinter- und Vorderachse und die im Reifenlatsch seitlich versetzt angreifenden Bremskräfte auftretende, übersteuernd wirkende Giermoment $M_{Z, \text{Radlastverschiebung}}$ vollständig zu kompensieren.

⁵⁰² Schick, Bunz (2005): Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten

⁵⁰³ Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

⁵⁰⁴ Schick, Bunz (2005): Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten

Bild 8.7 vergleicht das exemplarische Bremsverhalten eines Fahrzeugs mit achsweiser Bremskraftverteilung (Fahrzeug A) und eines Fahrzeugs mit radindividueller Bremskraftverteilung (Fahrzeug B) im Bereich einer mittleren Längsverzögerung. Fahrzeug A (Bild 8.7, oben) zeigt aufgrund der Radlastverschiebung von Hinter- zu Vorderachse und der im Reifenlatsch seitlich versetzt angreifenden Bremskräfte ein deutlich übersteuerndes Fahrverhalten und weicht in der Folge deutlich vom Ausgangskurs ab. Bei Fahrzeug B (Bild 8.7, unten) wird das verzögerungsinduzierte Giermoment $M_{Z, \text{Radlastverschiebung}}$ hingegen durch eine im Vergleich zu den kurveninneren Rädern stärkere Bremsung der kurvenäußeren Räder kompensiert und die Kursabweichung infolge des geringeren Summengiermoments $M_{Z, \text{reduziert}}$ minimiert.

In der zugehörigen ISO-Norm⁵⁰⁵ werden zahlreiche Bewegungskenngrößen zur Auswertung des Kurvenbremsverhaltens vorgeschlagen, u.a. die Zeitwerte der Differenz der Gierrate und der Querb beschleunigung zu den jeweiligen Referenzwerten

$$\Delta \dot{\psi}(t) = \dot{\psi}(t) - \frac{v_x(t)}{R_0} \quad \text{mit} \quad \dot{\psi}_{ref} = \frac{v_x(t)}{R_0} \quad (5.7)$$

$$\Delta a_y(t) = a_y(t) - \frac{v_x^2(t)}{R_0} \quad \text{mit} \quad a_{y,ref} = \frac{v_x^2(t)}{R_0} \quad (5.8)$$

Die Referenzwerte der Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}_{ref}$ und Querb beschleunigung $a_{y,ref}$ entsprechen derjenigen Giergeschwindigkeit bzw. Querb beschleunigung, mit der das Fahrzeug bei der jeweils aktuellen Fahrgeschwindigkeit $v_x(t)$ exakt den Ausgangsradius R_0 befahren würde. Weitere in ISO 7975 genannte Beurteilungsgrößen sind die Verhältnisse der Maximalwerte von Giergeschwindigkeit, Querb beschleunigung und Schwimmwinkel im Fzg.-Schwerpunkt zu den jeweiligen Ausgangswerten sowie die maximale Giergeschwindigkeitsdifferenz nach (5.7) als Funktion der mittleren Längsverzögerung bis zum Stillstand des Fahrzeugs \bar{a}_x

$$\left(\frac{\dot{\psi}_{max}}{\dot{\psi}_0}; \frac{a_{y,max}}{a_{y,0}}; \frac{\beta_{max}}{\beta_0}; \Delta \dot{\psi}_{max} \right) = f_i(\bar{a}_x) \quad (5.9)$$

Ebenfalls vorgeschlagen werden das Verhältnis von Giergeschwindigkeit und Querb beschleunigung zu ihren jeweiligen Ausgangswerten, der Schwimmwinkel im Fzg.-Schwerpunkt und die seitliche Abweichung des Fzg.-Schwerpunkts vom Ausgangsradius, jeweils zum Zeitpunkt $t_n = 1$ s nach Bremsbeginn und in Abhängigkeit der mittleren Längsverzögerung.

⁵⁰⁵ ISO 7975 (1985): Braking in a turn – Open loop test procedure (first edition)

$$\left(\frac{\dot{\psi}_{t_n}}{\dot{\psi}_0}; \frac{a_{y,t_n}}{a_{y,0}}; \beta_{t_n}; \Delta_{y,SP}\right) = f_i(a_x, t_n) \quad (5.10)$$

Allerdings räumt die Normungsschrift 1985 auch ein, dass nach damaligem Wissensstand nicht bekannt sei, welche Bewegungskenngrößen zur Beschreibung eines sicheren Fahrzeugverhaltens am geeignetsten sind. Die Untersuchung der geeigneten Kenngrößen war Gegenstand zahlreicher Studien in den 70er- bis 90er-Jahren. Demnach werden nach der Zusammenfassung der Testverfahren 1997/1998 von Zomotor et al.⁵⁰⁶ in Open-Loop-Durchführung mit fixiertem Lenkrad vor allem die Giergeschwindigkeit, Querbesehleunigung und der Schwimmwinkel zum Zeitpunkt eine Sekunde nach Bremsbeginn vorgeschlagen.^{507,508,509,510,511,512,513,514,515,516,517} Dabei finden insbesondere die auf den jeweiligen Ausgangswert bezogenen Bewegungskenngrößen in Abhängigkeit der Längsverzögerung Verwendung. Teilweise wird auch die Abweichung der Giergeschwindigkeit vom Referenzwert zum Zeitpunkt eine Sekunde nach Bremsbeginn verwendet, siehe Zomotor⁵¹⁸ und (5.7). Die Verwendung der Ein-Sekunden Werte wird in wie folgt begründet:⁵¹⁹ Der Fahrer könne auf die Fahrzeugreaktion erst nach Ablauf der üblichen Reaktionszeit reagieren und das Fahrzeug stabilisieren. Das Fahrzeugverhalten nach einer Sekunde sei daher „...so charakteristisch, dass es auch für den geschlossenen Regelkreis wichtige Hinweise gibt.“. Nach einer aktuelleren Studie aus dem Jahr 2005 wird zur Bewertung der Fahrstabilität während des Hochgeschwindigkeitskurvenbremsens aus 200 km/h hingegen die maximale Abweichung der Giergeschwindigkeit von ihrem stationären Ausgangswert verwendet.⁵²⁰ Als ergänzende Open-Loop-Kenngrößen werden in weiteren Veröffentlichungen die Winkel- oder Seitenabweichung des Fahrzeugs vom Ausgangsradius verwendet.^{521,522,523} In Closed-Loop-Untersuchungen zum Kurvenbremsverhalten werden der Lenkradwinkelverlauf während der Bremsung in ei-

⁵⁰⁶ Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

⁵⁰⁷ Ehlich et al. (1983): Fahrverhalten von PKW bei Einsatz von Noträdern

⁵⁰⁸ Grunow et al. (1983): Testverfahren für PKW mit automatischen Blockierverhinderern

⁵⁰⁹ Kuralay (1986): Einfluss von Fahrwerkselastizitäten und Reifenparametern auf das Fahrverhalten

⁵¹⁰ Rompe (1982): Möglichkeiten und Grenzen objektiver Fahrverhaltens-Tests

⁵¹¹ Rompe (1978): Testverfahren für das Bremsen in der Kurve

⁵¹² Rompe, Donges (1983): Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger PKW

⁵¹³ Rompe, Grunow (1980): Fahrverhalten von PKW beim Bremsen in der Kurve auf nassen Fahrbahnen

⁵¹⁴ Rompe, Heißing (1984): Möglichkeiten zur Bewertung der Fahreigenschaften

⁵¹⁵ Zomotor et al. (1980): Bremsen in der Kurve - Untersuchung eines Testverfahrens

⁵¹⁶ Zomotor, Kuhn (1982): Verbesserung der Aktiven Sicherheit von Personenwagen-Caravan-Zügen

⁵¹⁷ Zomotor et al. (1982): Stabilität und aerodynamisches Störverhalten von PKW-Wohnanhängerzügen

⁵¹⁸ Zomotor (1978): Meßverfahren bei der Auslegung des Fahrverhaltens

⁵¹⁹ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁵²⁰ Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme

⁵²¹ Rompe (1978): Testverfahren für das Bremsen in der Kurve

⁵²² Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

⁵²³ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

ner markierten Kurvengasse^{524,525} und der benötigte Lenkradwinkel zur Einhaltung des Ausgangsradius bewertet.⁵²⁶

Nach einer Veröffentlichung von Zomotor et al. aus den 80er-Jahren korrelieren die folgenden Kenngrößen besonders signifikant mit dem Subjektivurteil von Testfahrern:⁵²⁷

- der auf den Startwert bezogene Maximalwert der Giergeschwindigkeit
- die maximale Gierwinkelabweichung eine Sekunde nach Bremsbeginn
- der Zeitwert (eine Sekunde nach Bremsbeginn) und Maximalwert des Schwimmwinkels im Fzg.-Schwerpunkt

Eine weitere Studie zur Stabilität in Kurvenbremsung aus höheren Kurvengeschwindigkeiten (bis 180 km/h und mit verschiedenen Ausgangsquerbeschleunigungen) nennt 2005 den quadratischen Mittelwert der Gierbeschleunigung über dem Auswertezeitraum t_e mit der Messfrequenz f als den am besten geeigneten Kennwert zur Objektivierung von Subjektivurteilen in Kurvenbremsung.⁵²⁸

$$\ddot{\psi}_{QuMW} = \frac{\left| \sum_{t_0}^{t_e} \ddot{\psi}_i \cdot |\ddot{\psi}_i| \right|}{\sum_{t_0}^{t_e} \ddot{\psi}_i \cdot |\ddot{\psi}_i|} \cdot \sqrt{\frac{\left| \sum_{t_0}^{t_e} |\ddot{\psi}_i| \right|^2}{f \cdot t_e}} \quad (5.11)$$

Durch die Mittelwertbildung der Gierbeschleunigung über den gesamten Auswertezeitraum t_e könne demnach eine quantitative Unterscheidung der Intensität der Gierreaktion des Fahrzeugs erfolgen. Ein Fahrzeug mit abklingender Gierbeschleunigung weise die Tendenz auf, sich selbst zu stabilisieren und sei daher dem Kennwert zufolge besser beherrschbar. Der Bericht weist jedoch gleichzeitig auf den fehlenden wissenschaftlichen Beleg dieser Empfehlung hin.

In den bisher veröffentlichten Forschungsergebnissen sind nur wenige Empfehlungen für Akzeptanzgrenzen der jeweils verwendeten Bewegungskennwerte zur Beschreibung der Fahrstabilität enthalten. Der Automobilhersteller Fiat schlägt 1975 innerhalb des ISO-Komitees vor, die Giergeschwindigkeit in Kurvenbremsung sollte generell das 1,5-fache der Ausgangsgiergeschwindigkeit nicht überschreiten.⁵²⁹ Rompe et al.⁵³⁰ nennen

⁵²⁴ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

⁵²⁵ Rompe (1982): Möglichkeiten und Grenzen objektiver Fahrverhaltens-Tests

⁵²⁶ Rompe, Heißing (1984): Möglichkeiten zur Bewertung der Fahreigenschaften

⁵²⁷ Zomotor et al. (1980): Bremsen in der Kurve - Untersuchung eines Testverfahrens

⁵²⁸ Schick, Bunz (2005): Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten

⁵²⁹ Fiat (1975): Proposal for Straight-Line and In-A-Turn Braking Test Procedures

⁵³⁰ Rompe et al. (1980): Erprobung eines Testverfahrens für das Bremsen in der Kurve

1980 einen maximal tolerierbaren Schwimmwinkel von 15° eine Sekunde nach Bremsbeginn, während eine schwedische Fahrsicherheitsstudie⁵³¹ 1974 einen maximalen Schwimmwinkel von 20° über der gesamten Manöverdauer als Sicherheitsgrenze beschreibt. Es existieren jedoch – ähnlich wie zu dem Testmanöver *stationäre Kreisfahrt* – weitere qualitative Gestaltungshinweise für ein sicheres Fahrzeugverhalten: So soll die Bewertung der Fahreigenschaften nach Rompe/Heißing⁵³² vor allem anhand der resultierenden seitlichen Kursabweichung und der Gierstabilität erfolgen. Das Fahrzeug sollte hierbei im Idealfall nicht vom eingeschlagenen Kurs abweichen und keine zusätzliche Drehbewegung um die Hochachse erfahren.⁵³³ Ein leichtes zusätzliches Eindrehen in die Kurve kann den Fahrer nach Heißing/Brandl⁵³⁴ und Schick/Bunz⁵³⁵ zwar bei der Kursführungsaufgabe unterstützen, sollte nach Heißing/Brandl mit steigender Fahrzeugschwindigkeit jedoch abnehmen. Zusätzlich ist für die Beherrschbarkeit des Fahrzeugs durch den Fahrer die erzielbare Längsverzögerung und das bei hohen Längsverzögerungen verbleibende Lenkvermögen ein wesentliches Kriterium.^{536,537} Neben der geforderten Gierstabilität wird von Rompe et al. daher ein Bereich für das verbleibende Lenkvermögen in Abhängigkeit des erzielbaren Bremsvermögens empfohlen, siehe Bild 8.8.



Bild 8.8 Empfohlener Bereich für das Lenk- und Bremsvermögen in Kurvenbremsung⁵³⁸ (1980)

⁵³¹ Rundkuist (1974): Steerability During Emergency Braking

⁵³² Rompe, Heißing (1984): Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

⁵³³ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

⁵³⁴ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

⁵³⁵ Schick, Bunz (2005): Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten

⁵³⁶ Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 17ff

⁵³⁷ Schick, Bunz (2005): Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten

⁵³⁸ Rompe et al. (1980): Erprobung eines Testverfahrens für das Bremsen in der Kurve

4. Lastwechselreaktion (Gaswegnahme oder Gasstoß in der Kurve)

Neben den Testmanövern stationäre Kreisfahrt und Kurvenbremsung existieren zahlreiche Untersuchungen zum Lastwechselverhalten bei Gaswegnahme oder eines Gasstoßes in Kurvenfahrt. Die Wirkzusammenhänge ähneln dabei den Effekten während einer Kurvenbremsung: Wird aus einer stationären Kreisfahrt heraus der Antriebsschlupf weggenommen, resultiert eine Radlastverschiebung von Hinter- zu Vorderachse und die zuvor benötigten Antriebskräfte an den Rädern zur Überwindung der Fahrwiderstände entfallen. Diese Antriebskräfte wirken in einer Kreisfahrt jedoch stabilisierend, da sie aufgrund der Verschiebung der Reifenaufstandsflächen unter Seitenkraft in Richtung Kurveninnenseite seitlich versetzt angreifen und somit ein der Gierbewegung des Fahrzeugs entgegengesetztes Giermoment erzeugen.⁵³⁹ Sowohl der Wegfall der Antriebskraft als auch die Radlastverschiebung von Hinter- zu Vorderachse bewirken bei Gaswegnahme ein zusätzlich in die Kurve eindrehendes Giermoment.

Während die Gaswegnahme für alle Fahrzeuge untersucht wird und in einer eigenen Norm zusammengefasst ist⁵⁴⁰, besitzt das Manöver Gasstoß aus einer stationären Kreisfahrt nur für hinterrad- oder allradangetriebene Fahrzeuge eine Relevanz hinsichtlich der Beurteilung des Fahrverhaltens. Ein hoher Längsschlupf an den Hinterrädern reduziert die übertragbare Seitenkraft der Hinterachse⁵⁴¹ und kann so eine deutliche Übersteuertendenz hervorrufen. Die gleichzeitig auftretende Längskraft wirkt nach Reimpell/Sponagel (1988) hingegen stabilisierend, weshalb es bei einer Kurvenfahrt im Bereich der Kraftschlussgrenze sinnvoll sein kann, das Fahrzeug mit geringem Antriebsschlupf “auf Zug zu halten“, um die stabilisierende Längskraft aufrecht zu erhalten und die destabilisierenden Effekte einer plötzlichen Gaswegnahme zu vermeiden.

Die Open-Loop-Testdurchführung der Gaswegnahme (fixed control) aus einer stationären Kreisfahrt ist in der Norm ISO 9816⁵⁴² definiert und kann ebenfalls entweder mit konstanter Ausgangsfahrgeschwindigkeit oder auf einem festen Kurvenradius erfolgen:

- Konstanter Kurvenradius: Empfohlen werden 100 m Kurvenradius, minimal sollte der Kurvenradius 40 m betragen.
- Konstante Ausgangsfahrgeschwindigkeit: Als Standardwert werden 100 km/h genannt, Abweichungen sollten in 20 km/h Schritten gewählt werden.

⁵³⁹ Reimpell, Sponagel (1988): Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage

⁵⁴⁰ ISO 9816 (2006): Power-off reaction of a vehicle in a turn – Open-loop test method

⁵⁴¹ Heißing, Ersoy (2008): Fahrwerkhandbuch, 2. Auflage

⁵⁴² ISO 9816 (2006): Power-off reaction of a vehicle in a turn – Open-loop test method

- Bei beiden Varianten der Durchführung: Initiale Ausgangsquerbeschleunigung sollte 4 m/s^2 betragen und in weiteren Versuchen mit $0,5 \text{ m/s}^2$ Querbewegungsbeschleunigungsdifferenz oder einer geringeren Differenz gesteigert werden.

Aus der jeweiligen stationären Kreisfahrt mit einem fixierten Lenkrad heraus wird das Gaspedal sprunghaft gelöst. Die charakteristischen Bewegungskennwerte werden über der Ausgangsquerbeschleunigung $a_{y,0}$ aufgetragen und sind vergleichbar mit den zur Beurteilung des Kurvenbremsverhaltens gebildeten Bewegungskennwerten: Neben der mittleren Längsverzögerung \bar{a}_{x,t_n} werden vor allem die auf die Referenzgierrate $\dot{\psi}_{\text{Ref},t_x}$ und Referenzquerbeschleunigung a_{y,Ref,t_x} bezogenen Kennwerte zum Zeitpunkt $t_n = 1 \text{ s}$ oder zum Zeitpunkt der maximalen Abweichung t_{max}

$$\frac{\dot{\psi}_{t_n}}{\dot{\psi}_{\text{Ref},t_n}}; \frac{\dot{\psi}_{\text{max}}}{\dot{\psi}_{\text{Ref},t_{\text{max}}}} = f(a_{y,0}) \text{ mit } \dot{\psi}_{\text{ref}} = \frac{v_x(t)}{R_0} \quad (5.12)$$

$$\frac{a_{y,t_n}}{a_{y,\text{Ref},t_n}} = f(a_{y,0}) \text{ mit } a_{y,\text{ref}} = \frac{v_x^2(t)}{R_0} \quad (5.13)$$

verwendet. Die Norm empfiehlt ebenfalls eine Auswertung der maximalen Gierratenabweichung $\Delta \dot{\psi}_{\text{max}}$ und der Abweichung nach einem festen Auswertezeitraum $\Delta \dot{\psi}_{t_n}$ vom Referenzwert $\dot{\psi}_{\text{ref}}$ sowie eine Auswertung der absoluten Gierbeschleunigung nach einer Sekunde $\ddot{\psi}_{t_n}$

$$(\Delta \dot{\psi}_{\text{max}} = (\dot{\psi}_t - \dot{\psi}_{\text{Ref},t})_{\text{max}}; \Delta \dot{\psi}_{t_n} = \dot{\psi}_{t_n} - \dot{\psi}_{\text{Ref},t_n}; \ddot{\psi}_{t_n}) = f(a_{y,0}) \quad (5.14)$$

Weitere charakteristische Kennwerte sind der maximale Schwimmwinkel β_{max} , die maximale Differenz des Schwimmwinkels im gesamten Auswertezeitraum (2 Sekunden) zum Ausgangswert $\beta_{\text{max}} - \beta_0$ und zum Zeitpunkt $t_n = 1 \text{ s}$ nach Lastwechsel $\beta_{t_n} - \beta_0$. Ebenso wird die Differenz aus der momentanen Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}_{t_n}$ und der berechneten Giergeschwindigkeit $a_{y,t_n} / v_{x,t_n}$ zum Zeitpunkt t_n

$$\dot{\beta}'_{t_n} = \dot{\psi}_{t_n} - \frac{a_{y,t_n}}{v_{x,t_n}} \quad (5.15)$$

zur Auswertung vorgeschlagen. Dieser Kennwert beschreibt den Schwimmwinkelgradienten zum Zeitpunkt t_n unter Vernachlässigung des aktuellen Schwimmwinkels und der eine Sekunde nach Lastwechselbeginn vorherrschenden Längsverzögerung des Fahrzeugs.

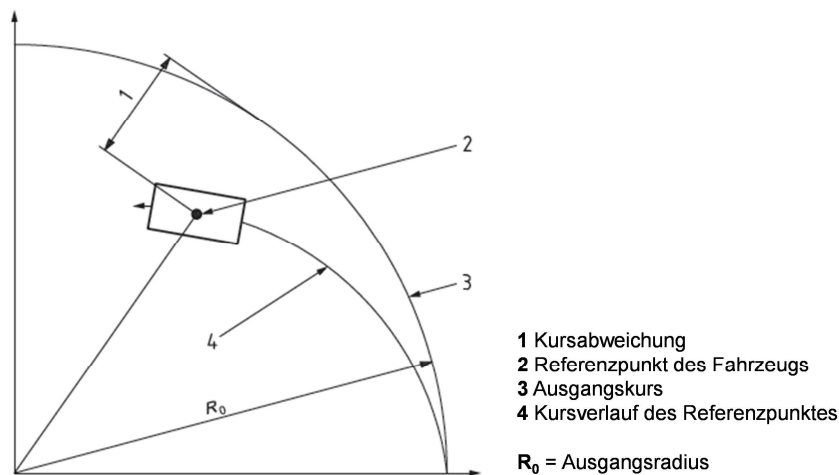


Bild 8.9 Bestimmung der Kursabweichung infolge Gaswagnahme in der Kurve nach ISO 9816⁵⁴³

Zusätzlich kann nach Bild 8.9 die Abweichung des Fahrzeugschwerpunktes (Referenzpunkt) von der ursprünglichen Kreisbahn Δy_{t_n} betrachtet werden. Hierbei wird der Auswertzeitraum zu $t_n = 2$ s gewählt, während zur Bildung der übrigen Kenngrößen durch die Norm ein Auswertzeitpunkt von $t_n = 1$ s nach Lastwechselbeginn empfohlen wird.

Nach der Zusammenfassung von Zomotor et al.⁵⁴⁴ werden zur Beschreibung des Open-Loop-Fahrverhaltens (fixed control) infolge Lastwechsels neben den häufig verwendeten Ein-Sekundenwerten der Giergeschwindigkeits- und Querbeschleunigungsänderung^{545,546} oder der Veränderung von Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung gegenüber ihren Referenzwerten^{547,548} auch Kennwerte genannt, die sich auf die Veränderung des Bahnkurvenverhaltens des Fahrzeugs beziehen. Hierbei sind die Radiusveränderung bezogen auf den Ausgangsradius^{549,550,551}, die Kursabweichung der Schwerpunktsbahn^{552,553} oder der Fahrspurvergleich über der Fahrgeschwindigkeit⁵⁵⁴ zu nennen. Lorenz et al. ziehen für einen Vergleich des Fahrverhaltens verschiedener Fahrzeuge sogar das Radwellenmoment bei Lastwechsel und beschleunigter Kreisfahrt heran.⁵⁵⁵ Diese Vielzahl an Kennwerten belegt den Wunsch der bekannten Untersuchungen,

⁵⁴³ ISO 9816 (2006): Power-off reaction of a vehicle in a turn – Open-loop test method, S. 8

⁵⁴⁴ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁵⁴⁵ Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

⁵⁴⁶ Rompe, Donges (1983): Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger PKW

⁵⁴⁷ Heißing et al. (1982): Vergleichende Messungen zum Fahrverhalten von PKW

⁵⁴⁸ Heißing et al. (1983): Fahreigenschaften des vierradgetriebenen Audi Quattro

⁵⁴⁹ Bantle et al. (1977): Fahrwerksauslegung und Fahrverhalten des Porsche 928

⁵⁵⁰ Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

⁵⁵¹ Uffellmann (1981): Lastwechselreaktion des frontgetriebenen PKW bei Kurvenfahrt

⁵⁵² Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

⁵⁵³ Rompe, Donges (1983): Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger PKW

⁵⁵⁴ Rompe (1982): Möglichkeiten und Grenzen objektiver Fahrverhaltens-Tests

Kennwerte zu identifizieren, die das Fahrverhalten verschiedener Fahrzeuge bestmöglich differenzierbar machen, ohne dabei jedoch eine konkrete Bewertung des Fahrverhaltens hinsichtlich der erzielten Fahrsicherheit vorzunehmen. Daher wurde zunächst ein sehr breites Spektrum an möglichen Kennwerten betrachtet. Heute hat sich analog zum Testmanöver „Bremsen in der Kurve“ die Giergeschwindigkeitsabweichung eine Sekunde nach Lastwechsel als wesentliches Beurteilungskriterium durchgesetzt.⁵⁵⁶ Ein konkreter Bezug zur Beherrschbarkeit durch Normalfahrer wird hingegen nur von Otto im Jahr 1987 genannt, der als Grenzwert für das Gierbeschleunigungsverhalten einen „Gefährlichkeitsgrenzwert“ von $\ddot{\psi}_{\text{grenz}} = 5^\circ/\text{s}^2$ anführt.⁵⁵⁷ Oberhalb dieser Schwelle empfiehlt Otto zur Beurteilung des Fahrverhaltens infolge des Lastwechsels in der Kurve einen eigenen Kennwert aus der Summe der mittleren Giergeschwindigkeitsdifferenz zum Referenzwert $\Delta \bar{\psi}_{\text{Ref}, 0,5\text{s}-1\text{s}}$, geteilt durch die angenommene mittlere Reaktionszeit von 0,75 s, und der mittleren Gierbeschleunigung im Bereich zwischen 0,5 Sekunden und einer Sekunde, der als Bereich einer möglichen Lenkkorrektur angesehen wird.

$$\text{Kennwert}(\text{Otto}) = \frac{\Delta \bar{\psi}_{\text{Ref}, 0,5\text{s}-1\text{s}}}{0,75\text{s}} + \bar{\psi}_{0,5\text{s}-1\text{s}} \quad (5.16)$$

Unterhalb der genannten Gefährlichkeitsgrenze von $5^\circ/\text{s}^2$ Gierbeschleunigung sollte nach Otto (1987) die Zeitdauer betrachtet werden, bis das kurveninnere Vorderrad in Open-Loop-Durchführung erstmalig den Fahrstreifen verlässt. Die Fahrstreifenbreite wird hierbei zu 3,5 m gewählt. Weitere Veröffentlichungen von Akzeptanzgrenzen sind für dieses Manöver nicht bekannt.

8.3.3 Übergangsverhalten

Das sogenannte Übergangsverhalten beschreibt das Fahrzeugverhalten in Manövern, die einen Übergang von Geradeaus- in Kreisfahrt oder von Kreisfahrt in Geradeausfahrt beinhalten. Hierzu zählen neben dem *Lenkwinkelsprung* und dem *Dreieckimpuls* trotz enger Verwandtschaft zu den Reaktions- und Ausweichtests (zugehörig zum Wechselkurvenverhalten) auch der *Fahrstreifenwechsel* und der *ISO-Spurwechsel*.

1. Lenkwinkelsprung

Der *Lenkwinkelsprung* findet seit 1978 Verwendung und ist nach Zomotor et al. die älteste Methode zur Prüfung des Übergangsverhaltens.⁵⁵⁸ 1988 wurde dieses Open-Loop-

⁵⁵⁵ Lorenz et al. (1986): Einfluß des Sperrdifferentials auf Traktion und Fahrverhalten

⁵⁵⁶ Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

⁵⁵⁷ Otto (1987): Lastwechselreaktionen von PKW bei Kurvenfahrt, S. 43

⁵⁵⁸ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

Testmanöver zusammen mit weiteren Prüfungsverfahren in der ISO-Norm 7401⁵⁵⁹ zusammengefasst.

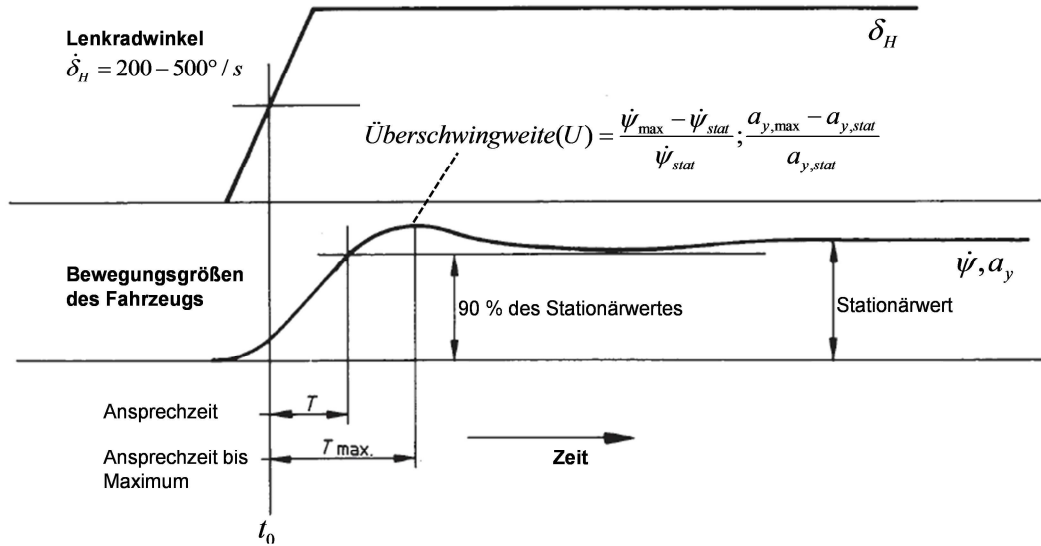


Bild 8.10 Durchführung und Auswertung des Lenkwinkelsprungs nach ISO 7401

Aus einer stationären Geradeausfahrt mit 80 km/h Fahrgeschwindigkeit wird der Lenkwinkel nach Bild 8.10 und ISO 7401 mit einer Lenkwinkelgeschwindigkeit zwischen $\dot{\delta}_H = 200\text{--}500^\circ/s$ sprunghaft auf den Zielwert eingestellt. Der Zielwert des Lenkwinkels sollte einer stationären Querbeschleunigung von 4 m/s^2 (alternativ 2 m/s^2 oder 6 m/s^2) entsprechen. Die Fahrzeugreaktion, gemessen in Form der Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$ und Querbeschleunigung a_y , folgt zeitverzögert nach und zeigt vor Erreichen des stationären Endzustandes eine für das jeweilige Fahrzeug charakteristische Überschwingweite $U_{\dot{\psi};a_y}$. Im Lenkwinkelsprung werden die Zeitverzögerungen bis Erreichen von 90 % des Stationärwerts bzw. des Maximums

$$T_{\dot{\psi};a_y} = t(\dot{\psi} = 0,9 \cdot \dot{\psi}_{\text{stat}}); t(a_y = 0,9 \cdot a_{y,\text{stat}}) \quad (5.17)$$

$$T_{\max,(\dot{\psi};a_y)} = t(\dot{\psi} = \dot{\psi}_{\max}); t(a_y = a_{y,\max}), \quad (5.18)$$

die bezogenen Überschwingweiten

$$U_{\dot{\psi};a_y} = \frac{\dot{\psi}_{\max} - \dot{\psi}_{\text{stat}}}{\dot{\psi}_{\text{stat}}}, \frac{a_{y,\max} - a_{y,\text{stat}}}{a_{y,\text{stat}}} \quad (5.19)$$

und die stationäre Gierverstärkung

⁵⁵⁹ ISO 7401 (1988): Lateral transient response test methods

$$GV_{stat} = \left(\frac{\dot{\psi}}{\delta_H} \right)_{stat} \quad (5.20)$$

als charakteristische Bewegungskenngrößen für das Fahrverhalten verwendet. Die Zeitverzüge $T_{\dot{\psi};a_y} / T_{\max,(\dot{\psi};a_y)}$ werden auf den Startzeitpunkt t_0 bezogen, zu dem 50 % des späteren stationären Lenkradwinkels anliegen. Die Eignung und Anwendbarkeit dieser Kennwerte zur Beurteilung des Fahrverhaltens im Lenkwinkelsprung wird nach Zomotor et al.⁵⁶⁰ in zahlreichen bekannten Publikationen bestätigt.^{561,562,563,564,565,566,567,568,569} Vor Normierung des Lenkwinkelsprungs wird teilweise auch die auf den Stationärwert der Giergeschwindigkeit bezogene Gierreaktion $\dot{\psi} / \dot{\psi}_{stat}$ betrachtet, siehe Zusammenfassung von Horn.⁵⁷⁰ Der 1988 zunächst in der Norm enthaltene *TB-Wert* als das Produkt aus der Ansprechzeit $T_{\max,\dot{\psi}}$ und dem stationär erzielten Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt $\beta_{SP,stat}$

$$TB = T_{\max,\dot{\psi}} \cdot \beta_{SP,stat} \quad (5.21)$$

wurde hingegen inzwischen aus der Norm entfernt, da dessen Verwendbarkeit in Forschungskreisen umstritten ist. Während Zomotor et al.⁵⁷¹ auf gute Korrelationsergebnisse des TB-Wertes mit der Subjektivbeurteilungen von Testfahrern hinweisen, kritisiert z.B. Jürgensohn⁵⁷² die gefundenen Korrelationen als zu fahrzeugabhängig und somit nicht allgemein anwendbar. Speziell bei Fahrzeugen, die mit einer Hinterradverstellung ausgestattet sind und somit je nach Auslegung der Hinterachslenkung gar keine oder nur sehr geringe Schwimmwinkel β_{SP} aufweisen können, sei nach Jürgensohn keine signifikante Korrelation des TB-Wertes mit der Subjektivbeurteilung von Fahrern nachweisbar.

Als Maß für die Fahrstabilität gelten insbesondere die Überschwingweite und die Ansprechzeit. Bei zu großen Werten der Überschwingweite kann das Fahrzeug demnach

⁵⁶⁰ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁵⁶¹ Bantle et al. (1977): Fahrwerksauslegung und Fahrverhalten des Porsche 928

⁵⁶² Donges, Rompe (1982): Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren

⁵⁶³ Ehlich et al. (1983): Fahrverhalten von PKW bei Einsatz von Noträdern

⁵⁶⁴ Kreutz et al. (2009): Improving vehicle dynamics by active rear wheel steering

⁵⁶⁵ Oberdieck et al. (1980): Identifizierung nichtlinearer Fahrzeugeigenschaften

⁵⁶⁶ Reichelt (1984): Identifikationsmethoden für die Fahrdynamik

⁵⁶⁷ Rompe, Donges (1983): Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger PKW

⁵⁶⁸ Thies et al. (2009): Funktionales Zusammenspiel von Fahrwerk und Antrieb

⁵⁶⁹ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

⁵⁷⁰ Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße, S. 22ff

⁵⁷¹ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁵⁷² Jürgensohn (1997): Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage

instabil werden.⁵⁷³ Außerdem wird eine „ausreichend kleine“ Anstiegszeit und Überschwingweite gefordert.⁵⁷⁴

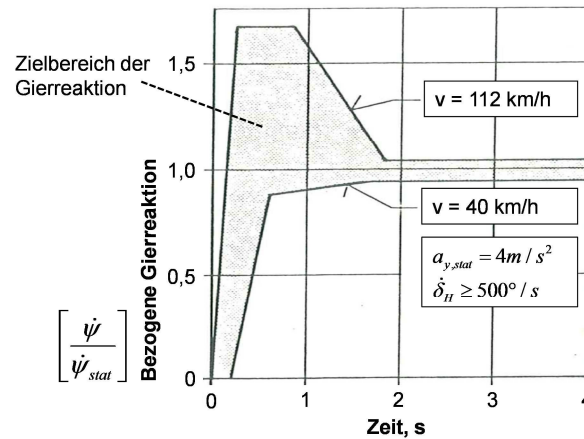


Bild 8.11 Vorgeschlagene Grenzkurven der Giergeschwindigkeitsreaktion auf einen Lenkwinkelsprung nach dem ESV-Projekt der USA (1969), abgebildet von Weir/Zellner⁵⁷⁵

Ein konkreter Vorschlag für Akzeptanzgrenzen wurde im Rahmen des ESV-Projekts (Enhanced Safety of Vehicles-Projekt) Ende der 60er-Jahre in den USA erarbeitet, abgebildet bei Weir/Zellner (1977): Demnach sollte die bezogene Gierreaktion bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten innerhalb einer skizzierten Hüllkurve bleiben, siehe Bild 8.11. Eine zu hohe Überschwingweite bei höheren Geschwindigkeiten (112 km/h) ist demnach ebenso zu vermeiden wie ein zu träges Ansprechen bei niedrigen Geschwindigkeiten (40 km/h). Horn kritisiert 1985 jedoch die Methodik zur Ableitung dieser Grenzkurven, da sie lediglich dem damals aktuellen Stand der Fahrzeuge in den USA angepasst worden seien.⁵⁷⁶

2. Dreieckimpuls

Ein weiteres in der ISO 7401 enthaltenes Open-Loop-Testmanöver ist der *Dreieckimpuls*, in dem das Fahrzeug aus stationärer Geradeausfahrt mit einem dreieckförmigen Lenkwinkelimpuls mit einer Impulsdauer von 0,3-0,5 s angeregt wird. Die Lenkradwinkelamplitude wird nach der Norm ebenfalls an einer stationären Querbewegung von 4 m/s^2 bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h ausgerichtet. Ausgewertet wird der Frequenzgang bzw. das Übertragungsverhalten von Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$ und Querbewegung a_y über dem Lenkradwinkel δ_H

⁵⁷³ Scholz et al. (2008): Aktive Fahrwerkssysteme am Beispiel einer neuen Hinterachslenkung

⁵⁷⁴ Kreutz et al. (2009): Improving vehicle dynamics by active rear wheel steering

⁵⁷⁵ Weir, Zellner (1977): The Application of Handling Requirements to an RSV-Type Vehicle

⁵⁷⁶ Horn (1985): Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße, S. 28f

$$\left(\frac{\dot{\psi}}{\delta_H} \right); \left(\frac{a_y}{\delta_H} \right).$$

In Studien der jüngeren Vergangenheit (2005) zu objektiven Bewertungsverfahren für radschlupfbasierte Regelsysteme wird das Testmanöver *Dreieckimpuls* in leicht abgewandelter Form verwendet, um den Zielkonflikt zwischen der erzielten querdynamischen Performance und der verbleibenden Stabilität zu bewerten.^{577,578} Die Fahrgeschwindigkeit beträgt 100 km/h, während die Lenkradwinkelamplitude in einem breiten Spektrum (50-270°) als in der Norm vorgesehen variiert wird. Als Kriterium für die querdynamische Performance wird von Fach et al. die maximal erzielte Querbeschleunigung $a_{y,max}$ infolge des Dreieckimpulses gegen das Stabilitätskriterium des Schwimmwinkelintegrals über die gesamte Manöverdauer $\int \beta_{SP}$ aufgetragen, siehe Bild 8.12.

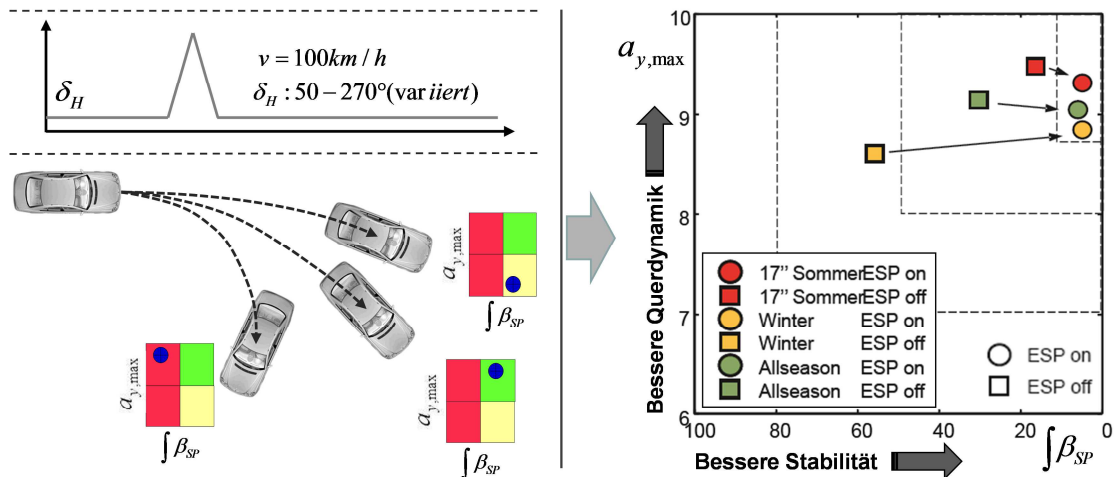


Bild 8.12 Bewertung des Zielkonflikts zwischen Stabilität und maximaler Querdynamik im Testmanöver Dreieckimpuls nach Fach et al.⁵⁷⁹

In der Gegenüberstellung von Fahrperformance und Stabilität nach Bild 8.12 (links) ist ein Fahrverhalten erwünscht, welches auf die Lenkeingabe mit einer ausreichenden Querbeschleunigung reagiert, dabei aber kein zu hohes Schwimmwinkelintegral aufweist. Die Studie verdeutlicht mit ihren Ergebnissen den stabilisierenden Einfluss des Regelsystems ESP bei im Einzelfall (Variante „Winter“) sogar gleichzeitig erhöhter Querdynamik, siehe Bild 8.12 (rechts). Konkrete Zielgrößen oder Akzeptanzgrenzen werden jedoch nicht genannt. Nach Keinert (2004) sind Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt größer 5° im Allgemeinen für den Fahrer jedoch kritisch zu beherrschen.

⁵⁷⁷ Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme

⁵⁷⁸ Keinert (2004): Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance

⁵⁷⁹ Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme, S. 72ff

3. ISO-Spurwechsel

Das Testmanöver *ISO-Spurwechsel* ist nach Zomotor et al.⁵⁸⁰ das heute am häufigsten durchgeführte Closed-Loop-Testverfahren und wurde bereits 1975 innerhalb der ISO-Normungsgremien diskutiert. Der durch drei Pylonengassen vorgegebene doppelte Spurwechsel lässt eine subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens in realen Ausweichsituationen im Bereich mittlerer bis höherer Fahrgeschwindigkeiten zu (üblicherweise bis maximal 120-140 km/h). Durch wechselseitige Lenkanregungen können je nach Anregungsfrequenz hohe Amplitudenausschläge der Fahrzeugreaktion resultieren.⁵⁸¹ Eine Normierung dieses in realen Versuchsfahrten ausschließlich im geschlossenen Regelkreis durchgeführten Closed-Loop-Testmanövers wurde zunächst nicht vorgenommen, da ein zu großer Fahrereinfluss auf die resultierenden objektiven Ergebnisse besteht.⁵⁸² Die Normierung dieses Testverfahrens in ISO 3888-1⁵⁸³ folgt daher erst 1999 und beschreibt lediglich die Durchführung des ISO-Spurwechsels nach Bild 8.13.

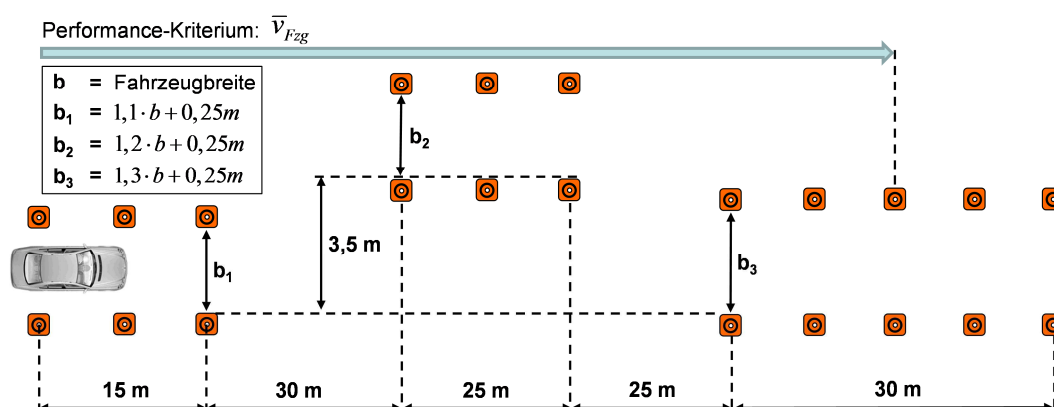


Bild 8.13 Abmaße des ISO-Spurwechsels nach ISO 3888-1

Um den Fahrereinfluss zu minimieren, ist die Breite der Pylonengassen b_1 , b_2 und b_3 von der Breite b des Fahrzeugs abhängig definiert und möglichst eng bemessen.⁵⁸⁴ Charakteristische Bewegungskennwerte zur Beurteilung des Fahrverhaltens werden von der Norm aufgrund des Fahrereinflusses nicht vorgeschlagen.

Das gängige Hauptkriterium für die erzielte querdynamische Performance ist die maximal mögliche mittlere Durchfahrtsgeschwindigkeit \bar{v}_{Fzg} zwischen der Einfahrt in die erste Pylonengasse und der Mitte der letzten Pylonengasse.^{585,586} Zur Bewertung des Fahr-

⁵⁸⁰ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁵⁸¹ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

⁵⁸² Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage

⁵⁸³ ISO 3888-1 (1999): Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change

⁵⁸⁴ Sagan (2007): Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, S. 24

⁵⁸⁵ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

verhaltens werden Maximalwerte, Mittelwerte, Integralwerte oder Zeitverzüge der Bewegungskennwerte untereinander von Schwimmwinkel β_{sp} ^{587,588,589}, Gierwinkel ψ ⁵⁹⁰, Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$ oder Gierbeschleunigung $\ddot{\psi}$ ^{591,592}, Querb beschleunigung a_y ^{593,594,595}, Wankwinkel ϕ ⁵⁹⁶ und Lenkaufwand δ_H ^{597,598,599} verwendet oder zusammengesetzte Kennwerte wie z.B. der *KD-Wert*⁶⁰⁰. Der KD-Wert wird nach Dibbern (1992) als Produkt der Differenz des maximalen Lenkradwinkels zwischen erstem und zweitem Fahrspurwechsel $\Delta\delta_{\max,2}$ und dem Zeitverzug $2,5\tau_{0(\delta,ay)}$ zwischen Lenkradwinkel und Querb beschleunigung aus der zugehörigen Kreuzkorrelationsfunktion gebildet:

$$KD = \Delta\delta_{\max,2} + 2,5\tau_{0(\delta,ay)} \quad (5.22)$$

Der KD-Wert korreliert nach Dibbern gut mit der Subjektivbeurteilung von Testfahrern. Die übrigen bekannten Aussagen zu Kennwerten mit der höchsten Korrelation zur Subjektivbeurteilungen sind unterschiedlich und lassen keine eindeutige Aussage zu: Nach Kudritzki erklärt die maximale Gierbeschleunigung $\ddot{\psi}_{\max}$ die Subjektivbeurteilung am besten⁶⁰¹, während Zomotor et al. die Subjektivbeurteilung hauptsächlich von der erforderlichen Lenkbewegung des Fahrers abhängig sehen.⁶⁰² Heißing/Brandl heben neben der erforderlichen Lenkarbeit zur Kurshaltung den Gierwinkel und die Giergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Lenkgeschwindigkeit hervor⁶⁰³, während Horiuchi et al. ihrerseits der Querb beschleunigung eine höhere Bedeutung für die Subjektivbeurteilung beimessen.⁶⁰⁴

Ein einheitlicheres Bild entsteht bei der Betrachtung von bekannten Gestaltungsmerkmalen für das Fahrverhalten im ISO-Spurwechsel. Nach Heißing/Brandl soll der Gier-

⁵⁸⁶ Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

⁵⁸⁷ Lincke et al. (1973): Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling Performance

⁵⁸⁸ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

⁵⁸⁹ Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

⁵⁹⁰ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

⁵⁹¹ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

⁵⁹² Kudritzki (1989): Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens

⁵⁹³ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

⁵⁹⁴ Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

⁵⁹⁵ Zomotor et al. (1997/1998): Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW

⁵⁹⁶ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

⁵⁹⁷ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

⁵⁹⁸ Wenzel et al. (2005): Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control

⁵⁹⁹ Zomotor et al. (1974): Doppelter Fahrspurwechsel

⁶⁰⁰ Dibbern (1992): Ermittlung eines Kennwertes für den ISO-Fahrspurwechsel

⁶⁰¹ Kudritzki (1989): Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens

⁶⁰² Zomotor et al. (1974): Doppelter Fahrspurwechsel

⁶⁰³ Heißing, Brandl (2002): Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens

⁶⁰⁴ Horiuchi, Yuhara (1996): Prediction of Vehicle Handling Qualities Using Multi-Input Driver Model

geschwindigkeitsaufbau zeitlich möglichst unverzögert und proportional zur Lenkgeschwindigkeit erfolgen. Eine Umkehrung dieses Zusammenhangs, d.h. ein träges Ansprechen der Gierreaktion, deutliche Phasenverzögerungen ϕ_ψ , „hektische Übergänge“ und ein Ausbrechen des Fahrzeugs in Form hoher Schwimmwinkel sind nach Hei3ing/Brandl und Rau⁶⁰⁵ zu vermeiden. Auch nach Bergmann⁶⁰⁶ soll die Querkraft zur Vermeidung eines unsicheren Fahrverhaltens beim Wechsel der Lenkrichtung ohne spürbaren Zeitverzug folgen. Dies wird durch einen hohen Schwimmwinkelbeschleunigungskoeffizienten indiziert. Während dem Phasenverzug zwischen Gierreaktion bzw. Querbesehleunigung und den Lenkradwinkeleingaben in der Literatur eine hohe Bedeutung beigemessen wird, konnte von Wesp in einer Studie aus dem Jahr 2008 bei konstanter Gierversärkung keine signifikante Unterscheidung der Subjektivbeurteilung in Abhängigkeit der variierten Phasendifferenz zwischen Gierrate und Querbesehleunigung untereinander nachgewiesen werden.⁶⁰⁷ Eine kurze Ansprechzeit T_ψ der Gierreaktion wird in einer Studie von Lincke et al. neben kleinen Schwimmwinkeln jedoch positiv beurteilt.⁶⁰⁸

Trotz der zahlreichen genannten Kriterien existieren für den ISO-Spurwechsel keine bekannten objektiven Akzeptanzgrenzen für das Fahrverhalten. Einzige Ausnahme ist die Betrachtung der Kippsicherheit eines Fahrzeugs, die dann erfüllt ist, wenn mindestens drei Räder des geprüften Fahrzeugs auf der Fahrbahn verbleiben.⁶⁰⁹ Die überwiegende Anzahl der bekannten Studien zu Spurwechselmanövern wurde mit beruflichen Testfahrern durchgeführt. Aus der jüngeren Vergangenheit existieren aber auch Studien, die der Forderung von Braess/Seiffert⁶¹⁰ Rechnung tragen und den Normalfahrer aufgrund der im Vergleich deutlich unterschiedlichen Bewertungsmaßstäbe und Fahrfertigkeiten direkt mit einbeziehen. Hierdurch verschärft sich zunächst die ohnehin bestehende Problematik einer eingeschränkten Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Testpersonen. Neben den erwartungsgemäß hohen Abweichungen zwischen den Lenkstrategien verschiedener Fahrer wird in den bekannten Studien aber auch eine „intraindividuelle Stabilität“ der Lenkeingaben von einzelnen Testperson nachgewiesen^{611,612} und von Neukum et al.⁶¹³ als „charakteristische Handschrift“ bezeichnet. Diese „Handschrift“ wird nach Neukum et al. auch in anspruchsvollen Situationen, z.B.

⁶⁰⁵ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

⁶⁰⁶ Bergmann (1973): Measurement and Subjective Evaluation of Vehicle Handling

⁶⁰⁷ Wesp et al. (2009): Die Systemauslegung von hinterachsgelenkten Fahrzeugen

⁶⁰⁸ Lincke et al. (1973): Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling Performance

⁶⁰⁹ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

⁶¹⁰ Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

⁶¹¹ Jürgensohn et al. (1997): Die Handschrift des Lenkens

⁶¹² Keen (2008): Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control

⁶¹³ Neukum et al. (2001): Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften?

einen Spurwechsel mit hoher Querbeschleunigungsanforderung, nicht verändert und beschränkt somit den Geschwindigkeitsbereich, den ein ungeübter Fahrer bewältigen kann. Abweichungen von diesem personenspezifischen Lenkmuster werden überdies bei hohen Anforderungen an den Fahrer im Lenkradwinkelverlauf sichtbar und vom Fahrer selbst als „Fahrfehler“ interpretiert. Als Ergebnis ihrer Analyse des ISO-Spurwechsels geben Neukum et al. den Bereich niedriger Anforderungen an den Fahrer im Bereich zwischen $4\text{--}5\text{ m/s}^2$ Querbeschleunigung und den Bereich hoher Anforderungen oberhalb von 7 m/s^2 an. Während die Durchführung eines Spurwechsels mit Expertenfahren darauf abzielt, objektive Unterschiede bezüglich des Fahrverhaltens darzulegen und zu bewerten, z.B. zur Prüfung des Potentials einer aktiven Hinterachskinematik⁶¹⁴, wird von Neukum et al. zur Erfassung von Subjektivurteilen in Studien mit Normalfahrern empfohlen, auf die Abfrage von konkreten Fahreigenschaften, wie z.B. „Ansprechverhalten“, „Direktheit“, „Fahrstabilität“ oder „Zielgenauigkeit“, zu verzichten und stattdessen eine Abfrage der Aufgabenschwierigkeit vorzunehmen.

8.3.4 Wechselkurvenverhalten

Die bekannten Manöver des Wechselkurvenverhaltens sind der *Frequenzgang* und dessen Sonderformen

- *Gierverstärkung*
- *Weavetest*
- *10 x 18 m Slalom*

Hinzu kommen das *Lenkungspendeln* und die mittlerweile überwiegend genormten Reaktions- und Ausweichtests, in deren Closed-Loop- oder Open-Loop-Durchführung entweder wechselseitige Fahrzeugreaktionen resultieren (Lenkungspendeln) oder das Fahrzeug durch wechselseitige Lenkeingaben angeregt wird (Reaktions- und Ausweichtests).

1. Gierverstärkung (stationäres Übertragungsverhalten)

Das Testmanöver Gierverstärkung ist ein Open-Loop-Testverfahren und wird nach Rau⁶¹⁵ dazu verwendet, das stationäre Gierübertragungsverhalten des Fahrzeugs bei konstanter Querbeschleunigung im gesamten Geschwindigkeitsbereich zu ermitteln. Der Gierverstärkungsfaktor

$$\text{Gierverstärkung}(GV) = \frac{\dot{\psi}_{stat}}{\delta_{H,stat}} \quad (5.23)$$

⁶¹⁴ Donges et al. (1990): Funktion der aktiven Hinterachskinematik von BMW

⁶¹⁵ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik

beschreibt hierbei das stationäre Übertragungsverhalten der Giergeschwindigkeit, bezogen auf einen stationären Lenkradwinkel. Dieses Testmanöver ist dennoch im Bereich des Wechselkurvenverhaltens angesiedelt, da die Lenkanregung in Form eines Sinus-Frequenzgangs mit einer Lenkfrequenz von 0,2 Hz erfolgt. Bei dieser geringen Lenkfrequenz kann eine quasistationäre Fahrzeugreaktion angenommen werden. Zur Ermittlung des Gierverstärkungsfaktors GV wird die Fahrgeschwindigkeit - beginnend bei $v = 20 \text{ km/h}$ - in Schritten von $\Delta v = 20 \text{ km/h}$ bis hin zur maximalen Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs gesteigert. Die Lenkradwinkelamplitude wird jeweils einer Querbeschleunigungsamplitude von 4 m/s^2 angepasst.

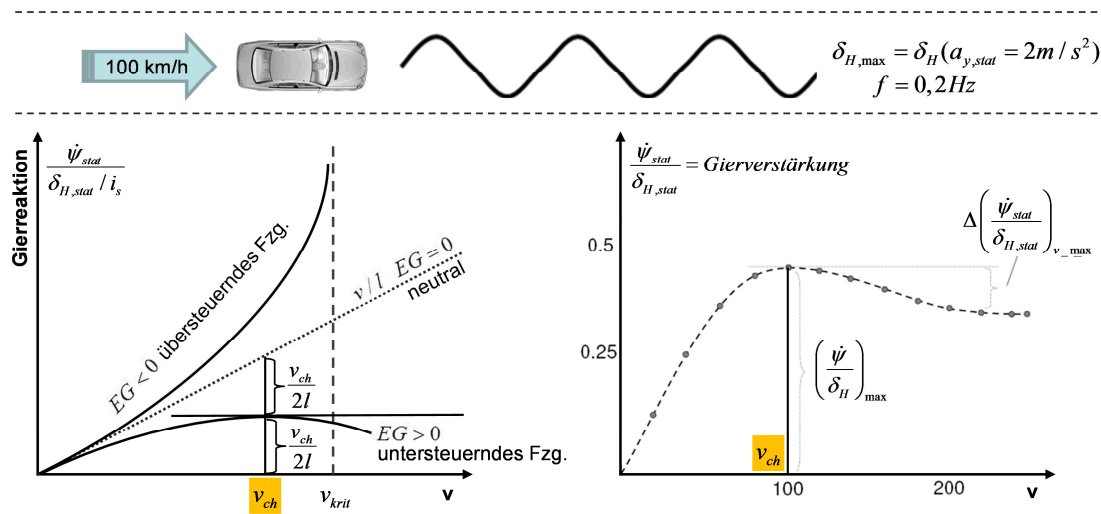


Bild 8.14 Charakteristische Gierreaktion in Abhängigkeit des Eigenlenkverhaltens (links) nach Zomotor⁶¹⁶ und gemessene Gierverstärkung eines heutigen Fahrzeugs (rechts) nach Rau⁶¹⁷

Bild 8.14 (links) zeigt die charakteristische Gierreaktion eines Fahrzeugs in Abhängigkeit der drei unterschiedlichen Eigenlenkcharakteristika. Die Gierverstärkung eines untersteuernden Fahrzeugs erzielt nach Zomotor bei der charakteristischen Fahrgeschwindigkeit v_{ch} ihr Maximum und fällt im Anschluss stetig ab. Ein neutrales Fahrzeug ($EG = 0$) zeigt hingegen einen linearen Anstieg der Gierverstärkung, deren Wert sich bei konstanter Lenkübersetzung i_s aus dem stationären Übertragungsverhalten

$$\left(\frac{\dot{\psi}}{\delta_H / i_s} \right)_{stat} = \frac{v}{l + EG \cdot v^2} \quad (5.24)$$

zu

⁶¹⁶ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 112

⁶¹⁷ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik, S. 38

$$\left(\frac{\dot{\psi}}{\delta_H / i_s} \right)_{EG=0,stat} = \frac{v}{l} \quad (5.25)$$

berechnet. Die Gierverstärkung eines übersteuernden Fahrzeugs strebt bei der kritischen Fahrgeschwindigkeit v_{krit} gegen unendlich. Die charakteristische Geschwindigkeit der heute ausnahmslos stationär untersteuernd ausgelegten Fahrzeuge liegt nach Zomotor im Bereich zwischen ca. 65-100 km/h.⁶¹⁸

Der Vergleich der Gierverstärkung eines linearisierten Einspurmodells nach Bild 8.14 (links) mit dem gemessenen Gierverstärkungsverlauf eines realen Fahrzeugs in Bild 8.14 (rechts) bestätigt die Grundcharakteristik der untersteuernden Auslegung des geprüften Fahrzeugs. Neben der geforderten Untersteuertendenz sind weitere Auslegungskriterien für die objektiven Kenngrößen in diesem Testmanöver bekannt: Das Maximum der Gierverstärkung (bei v_{ch}) sollte nach Rau⁶¹⁹ im unteren bis mittleren Fahrgeschwindigkeitsbereich liegen, um bei niedrigen Geschwindigkeiten ein „direktes“ Fahrverhalten zu vermitteln. Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten sollte die Lenkempfindlichkeit nach Rau hingegen abnehmen und eine größtmögliche Differenz zum Maximalwert der Gierverstärkung aufweisen. Diese Empfehlung ist plausibel, da die resultierende Querschleunigung bei konstanter Giergeschwindigkeit proportional zur Fahrgeschwindigkeit zunimmt.

$$a_{y,stat} = v \cdot \dot{\psi}_{stat} \quad (5.26)$$

Dies bedeutet, mit steigender Fahrgeschwindigkeit werden bei konstanter Lenkübersetzung i_s geringere Lenkradwinkelamplituden für eine identische Querschleunigung benötigt. Eine niedrigere Sensitivität der Gierbewegung des Fahrzeugs bei Hochgeschwindigkeit unterstützt somit den Fahrer in seiner Kursführungsaufgabe. Weir/Di Marco⁶²⁰ geben den optimalen Auslegungsbereich der maximalen Gierverstärkung 1978 mit $GV = 0,2-0,4$ /s an.

2. Frequenzgang (instationäres Übertragungsverhalten)

Während in stationärer Kreisfahrt bzw. dem zuvor genannten Testmanöver *Gierverstärkung* ausschließlich das stationäre Fahrverhalten eines Fahrzeugs geprüft wird, findet durch das Testmanöver *Frequenzgang* eine Erweiterung dieser Betrachtungen auf den instationären Bereich statt. Die Open-Loop-Durchführung des Frequenzgangs wurde 1988 im Rahmen der ISO 7401⁶²¹ genormt. Demnach wird das Fahrzeug bei einer Fahr-

⁶¹⁸ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 115

⁶¹⁹ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik, S. 38f

⁶²⁰ Weir, Di Marco (1978): Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data

⁶²¹ ISO 7401 (1988): Lateral transient response test methods

geschwindigkeit von 80 km/h mit einer in der Frequenz varierten, sinusförmigen Lenkradwinkleingabe beaufschlagt und reagiert nach einem Einschwingvorgang mit einer ebenfalls sinusförmig ausgeprägten Antwort der Bewegungsgrößen. Der geprüfte Frequenzbereich der sinusförmigen Lenkanregung sollte den Bereich bis ca. 4 Hz abdecken, wobei die konstante Lenkradwinkelamplitude $\delta_{H,\max}$ entsprechend einer stationären Querbewegung von 4 m/s^2 gewählt wird. Zur Auswertung sollten mindestens drei vollständige Sinusperioden durchlaufen werden. Ausgewertet werden die Amplitudengänge, die Verstärkungsfaktoren und die Phasengänge der relevanten Bewegungsgrößen des Fahrzeugs. Die Norm sieht 1988 eine Auswertung des Frequenzgangs für die Querbewegung a_y und die Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$ vor, heute werden jedoch gängiger Weise ebenfalls die Frequenzgänge des Schwimmwinkels β und des Wankwinkels ausgewertet sowie zusätzliche Fahrgeschwindigkeiten gewählt, siehe z.B. Rau⁶²²:

- Amplitudengänge

$$a_{y,\max}; \dot{\psi}_{\max}; \beta_{\max}; \varphi_{\max} = f(\text{Lenkfrequenz}) \quad (5.27)$$

- Verstärkungsfaktoren

$$\frac{a_y; \dot{\psi}; \beta; \varphi}{\delta_H} = f(\text{Lenkfrequenz}) \quad (5.28)$$

- Phasengänge

$$\phi_{\frac{a_y; \dot{\psi}; \beta; \varphi}{\delta_H}} = f(\text{Lenkfrequenz}) \quad (5.29)$$

Bild 8.15 (links) zeigt einen typischen Verlauf der Gierverstärkung über der Anregungsfrequenz für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten nach Rau. Durch die bereits bekannte Abhängigkeit der Gierverstärkung von der Fahrgeschwindigkeit resultiert bei niedrigen Frequenzen (quasistationären) Lenkanregungen bis hin zur charakteristischen Fahrgeschwindigkeit eine höhere Gierverstärkung als bei verminderter Fahrgeschwindigkeit. Die Gierverstärkung erzielt bei Durchlaufen der Giereigenfrequenz des Fahrzeugs ihr Maximum. Die Überhöhung der Gierverstärkung im Resonanzbereich fällt umso höher aus, je geringer die Gierdämpfung $D_{\dot{\psi}}$ ist. Da die Gierdämpfung eines Fahrzeugs nach Zomotor⁶²³ und Kapitel 2.1.2 mit der Fahrgeschwindigkeit abnimmt, treten bei höherer Fahrgeschwindigkeit tendenziell stärkere Überhöhungen der Gierverstärkung auf, die zu einer Instabilität des Fahrverhaltens führen können. Nach Durchschreiten des Resonanzbereichs fällt die Gierverstärkung mit steigender Lenkfrequenz ab. Der Phasenwin-

⁶²² Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik, S. 39

⁶²³ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 120

kel der Giergeschwindigkeit nach Bild 8.15 (rechts) verläuft entsprechend einem System zweiter Ordnung von ca. 0° Phasenverzug bei niedriger Anregungsfrequenz bis hin zu -90° Phasenverzug bei hochfrequenter Anregung.

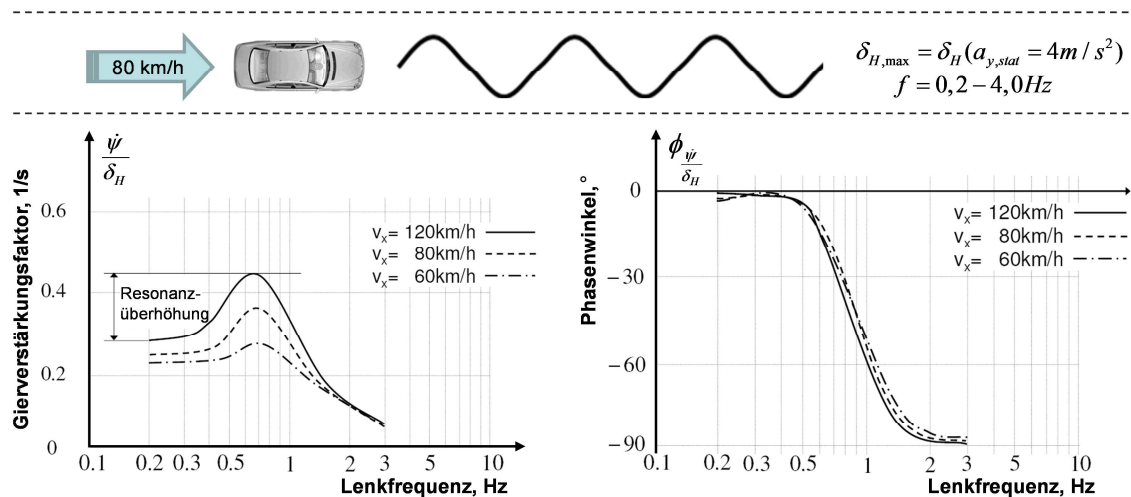


Bild 8.15 Ermittelter Gierverstärkungsverlauf (links) und Phasengang (rechts) der Giergeschwindigkeit in einem Frequenzgang nach Rau⁶²⁴

Für das Manöver *Frequenzgang* sind wenige Aussagen bekannt, die in einem direkten Zusammenhang mit der erzielten Fahrsicherheit des Fahrzeugs stehen. Aus den Ausführungen zur Stabilität des Fahrverhaltens bei instationärer Lenkanregung in Kapitel 2.1.2 nach Zomotor⁶²⁵ kann jedoch das Ziel abgeleitet werden, die Resonanzüberhöhung im Bereich der Giereigenfrequenz durch eine ausreichende Gierdämpfung zu minimieren. Dies gilt speziell für den Hochgeschwindigkeitsbereich mit einer im Vergleich zu niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten deutlich verminderten Gierdämpfung. Weir/Di Marco⁶²⁶ empfehlen für die Auslegung des Fahrverhaltens eine Gierdämpfung $D_{\dot{\psi}}$ größer als 0,5. Zudem sollte die aus dem Übertragungsverhalten bei instationärer Lenkanregung bekannte Zählerzeitkonstante T_z kleiner als 0,3 s sein. Dies führt nach Weir/Di Marco zu einer Vergrößerung der Giereigenfrequenz ω , wodurch das Fahrzeug bei niederfrequenten Anregungen durch den Fahrer stabiler ist. Die Giereigenfrequenz ω sollte der Veröffentlichung nach oberhalb von 0,5 Hz liegen.

3. Weavetest

Der *Weavetest* ist ein 2003 ebenfalls der Normung unterworfenen Open-Loop-Testmanöver⁶²⁷ und kann in seiner Durchführung als Sonderfall des Frequenzgangs be-

⁶²⁴ Rau (2007): Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik, S. 39

⁶²⁵ Zomotor, Reimpell (1991): Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, S. 117ff

⁶²⁶ Weir, Di Marco (1978): Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data

⁶²⁷ ISO 13674-1: Test method for the quantification of on-centre handling – Part 1: Weave

trachtet werden (verminderte stationäre Querschleunigungsamplitude von 2 m/s^2 , feste Lenkfrequenz von $0,2 \text{ Hz}$ und eine Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h). Der Weave-test wird nach Braess/Seiffert vorwiegend zur Beurteilung des Lenkradmomenteverlaufs über dem Lenkradwinkel im Bereich der Lenkradmittenstellung verwendet und liefert Rückschlüsse auf die Kurskorrigierbarkeit bei kleinen Lenkanregungen auf gerader Strecke.⁶²⁸

Zur Auswertung werden Lenkmoment M_H , Querschleunigung a_y , Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$ und Lenkradwinkel δ_H gegeneinander aufgetragen und als Kennwerte insbesondere die jeweiligen Werte der Hysteresen und der Gradienten von $M_H; a_y; \dot{\psi}$ um die Nulllage des Lenkradwinkels betrachtet, siehe z.B. Dettki.⁶²⁹ Diese im Weavetest ermittelten Kennwerte werden von Zschocke dazu verwendet werden, die subjektive Beurteilung des Geradeauslaufs, der Lenkpräzision oder der Mittenzentrierung in Closed-Loop-Studien auf Überland- oder Autobahnfahrten zu erklären.⁶³⁰

4. Lenkungspendeln

Durch das Testmanöver *Lenkungspendeln* erfolgt eine Beurteilung der Stabilität des Fahrzeugs bei plötzlich los gelassener Lenkung aus einer zuvor stationären Kreisfahrt heraus. Der Open-Loop-Test wurde 2002 genormt⁶³¹ und beschreibt die Durchführung bei einer Standardgeschwindigkeit von 100 km/h mit konstant gehaltener Fahrpedalstellung und variiert Ausgangsquerschleunigung $a_{y,0}$. Die Querschleunigung wird beginnend bei $a_{y,0} = 1 \text{ m/s}^2$ in vorgeschlagener Schrittweite von $\Delta a_y = 1 \text{ m/s}^2$ erhöht, bis entweder die Kraftschlussgrenze erreicht ist, oder das Fahrzeugverhalten instabil wird, d.h. keine Selbststabilisierung bei freier Lenkung mehr vorhanden ist und das Fahrzeug sich bei frei gegebener Lenkung „aufschauelt“.

Als charakteristische Kennwerte werden das Verhältnis des ersten und zweiten Maximums nach Freigabe des Lenkrads von Schwimmwinkel β_{SP} , Gierrate $\dot{\psi}$ und Lenkradwinkel δ_H

$$\frac{(\beta_{SP}; \dot{\psi}; \delta_H)_{\max,1}}{(\beta_{SP}; \dot{\psi}; \delta_H)_{\max,2}} = f(a_{y,0}), \quad (5.30)$$

die Werte des zweiten Maximums nach Freigabe des Lenkrads

⁶²⁸ Braess, Seiffert (2002): Handbuch Kraftfahrzeugtechnik

⁶²⁹ Dettki (1997): Methoden zur Bewertung des Geradeauslaufs von PKW

⁶³⁰ Zschocke (2009): Objektive und subjektive Evaluierung des Lenkkomforts von Kraftfahrzeugen, S. 113ff

⁶³¹ ISO 17288-1 (2002): Free-steer behaviour – Part 1: Steering-release open-loop test method

$$(\beta_{SP}; \psi; \delta_H)_{\max,2} = f(a_{y,0}) \quad (5.31)$$

und die Verzugszeiten der ersten Maxima von Querbeseleunigung und Lenkradwinkel bezogen auf den Zeitpunkt t_{50}

$$t_{a_{y,\max,1}}; t_{\delta_{H,\max,1}} = f(a_{y,0}), \quad (5.32)$$

verwendet. Der Zeitpunkt t_{50} beschreibt hierbei den Zeitpunkt, zu dem der Lenkradwinkel nach Lenkradfreigabe erstmals auf 50 % des Ausgangslenkradwinkels $\delta_{H,0}$ zurückgefallen ist.

Obwohl der Untersuchungsinhalt dieses Testmanövers das Thema Fahrstabilität behandelt, sind keine über die Normierung hinaus gehenden Informationen zur Korrelation der genannten Kennwerte mit Subjektivurteilen bekannt. Ebenfalls wurden auf Basis der genannten Kennwerte bisher keine objektiven Auslegungskriterien abgeleitet.

5. Reaktions- und Ausweichtests (VDA, Elchtest, ADAC Ausweichtest)

Neben dem ISO-Spurwechsel aus ISO 3888-1⁶³², der in der Norm als Spurwechseltest definiert wurde und somit dem Übergangsverhalten zugeordnet ist, existieren weitere Closed-Loop-Testverfahren, die explizit der Kategorie der Reaktions- und Ausweichtests zugeordnet werden: Der *VDA-Ausweichtest*, der *Elchtest* und der *ADAC-Ausweichtest*.

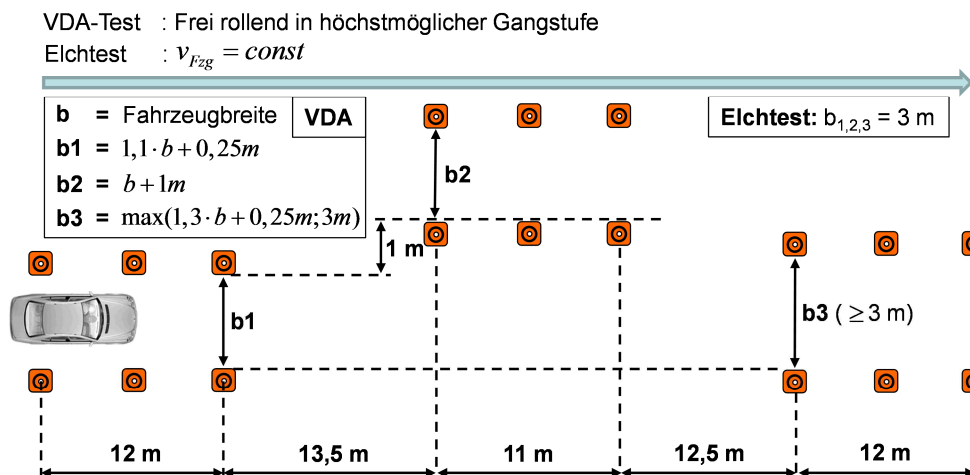


Bild 8.16 Abmaße des VDA-Ausweichtests nach ISO 3888-2 und des sogenannten „Elchtests“

Der 2002 in ISO 3888-2⁶³³ ebenfalls genormte VDA-Ausweichtest nach Bild 8.16 basiert auf dem bereits zuvor bekannten „Elchtest“ und wurde mit der Zielsetzung ange-

⁶³² ISO 3888-1 (1999): Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change

⁶³³ ISO 3888-2 (2002): Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance

passt – analog der Definition des ISO-Spurwechsels – den Handlungsspielraum der Testfahrer zu minimieren, um besser vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Der Unterschied zwischen dem genormten VDA-Ausweichtest und dem Elchtest aus Bild 8.16 besteht zum einen in der beim VDA-Test von der Breite b des Fahrzeugs abhängigen Fahrgassenbreite, zum anderen erfolgt die Durchfahrt des VDA-Tests frei rollend in der höchstmöglichen Gangstufe, während die Fahrgeschwindigkeit beim Elchtest konstant gehalten wird.

Zwar wird der ISO-Spurwechsel in der Literatur deutlich häufiger behandelt als der VDA- oder Elchtest, die Bewertungskriterien des VDA-Ausweichtests sind nach Heiβing/Ersoy⁶³⁴ jedoch mit den Kriterien des ISO-Spurwechsels vergleichbar: Demnach sollte die Gierreaktion des Fahrzeugs den Lenkeingaben des Fahrers möglichst ohne Phasenverzug folgen, während „hektische Überreaktionen“ oder eine hohe Trägheit des Fahrzeugs mit großen erforderlichen Lenkkorrekturen unerwünscht sind. Zusätzlich kann dieses Testmanöver genutzt werden, um die Wirksamkeit von elektronischen Stabilisierungssystemen hinsichtlich Kipp- und Schleudersicherheit zu bewerten und abzusichern. Die bekanntesten objektiven Kriterien sind die maximal mögliche Einfahrtsgeschwindigkeit in den VDA-Test $v_{\max,0}$ und die im Anschluss an die Durchfahrt des Tests verbleibende Ausfahrtsgeschwindigkeit v_{Austritt} . Ein Fahrzeug mit hohem querdynamischen Potential und stabiler Hinterachse wird auch bei schneller Einfahrt in die Startgasse im Verlauf des Ausweichtests nur in geringem Maße durch Regelsysteme abgebremst, während kippgefährdete Fahrzeuge mit hoher Schwerpunktlage oder tendenziell zu Instabilität der Hinterachse neigende Fahrzeuge durch die zur Stabilisierung benötigten intensiven Radbremseingriffe verstärkt abgebremst werden. Der VDA-Test erfreut sich daher in Vergleichstests bekannter Automobil-Journale großer Beliebtheit.

Ein weiterer bekannter Ausweichtest ist der vom Allgemeinen Deutschen Automobil-Club e.V. (ADAC)⁶³⁵ zur Beurteilung der „allgemeinen Stabilität“ durchgeführte *ADAC-Ausweichtest*. In diesem Test erfolgt abweichend zum ISO-Spurwechsel und VDA-Ausweichtest ein explizites Ausweichen von einem durch Pylonen angezeigten Hindernis in Ausgangsfahrtrichtung. Die Durchführung dieses Closed-Loop-Testverfahrens erfolgt im Schubbetrieb der höchstmöglichen Gangstufe, die eine Drehzahl größer 2000 U/min zulässt, und mit einer minimal variierten Einfahrtsgeschwindigkeit von ca. ± 90 km/h. Die Lenkradwinkeleingaben werden – abweichend zur Gestaltungsprämisse des VDA-Tests – ebenfalls bewusst variiert, um das Fahrzeugverhalten bei verschiedenen Lenkanregungen zu beurteilen.

⁶³⁴ Heiβing, Ersoy (2008): Fahrwerkhandbuch, 2. Auflage

⁶³⁵ Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (2000): Der ADAC Ausweichtest – Nie ohne ESP

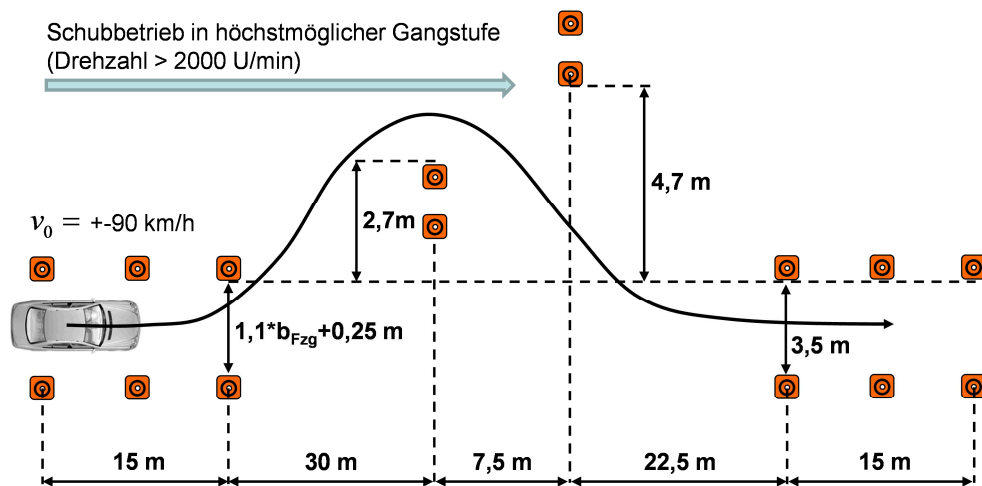


Bild 8.17 Abmaße des ADAC-Ausweichtests, Durchführung (ohne Maßangaben) beschrieben in ADAC⁶³⁶

Charakteristische Bewegungskennwerte zur Beurteilung der „allgemeinen Stabilität“ werden vom ADAC nicht genannt. Die Beurteilung erfolgt subjektiv.

6. 10x18 m Slalom

Die Durchführung des *10x18 m Slaloms* ist vor allem aus Testberichten der Automobil Fachpresse bekannt. Der Slalom wird hierbei als Closed-Loop-Test mit dem Ziel durchgeführt, die maximal mögliche mittlere Durchfahrtsgeschwindigkeit \bar{v}_{\max} des Testfahrzeugs zu ermitteln. Daher resultiert kein idealer Sinusverlauf des Lenkradwinkels. Neben dieser in Pressetests üblichen Gegenüberstellung von \bar{v}_{\max} existieren keine gängigen objektiven Kennwerte zur Beurteilung des Fahrverhaltens im Slalom-Test. Das Testverfahren wird in der heutigen Fahrzeugentwicklung jedoch – gemeinsam mit weiteren Testmanövern wie z.B. dem VDA-Test - dazu verwendet, die Kippsicherheit eines Fahrzeugs infolge hochdynamischer, wechselseitiger Anregung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich zu bewerten und abzusichern.

7. NHTSA Sine with dwell und NHTSA Fishhook

Seit der Einführung des elektronischen Stabilitäts-Programms *ESP*⁶³⁷ Ende der 90er-Jahre wird die Frage nach der Wirksamkeit der verbauten Bremsregelsysteme zur Vermeidung von Schleuderunfällen und zur Erhöhung der Kippsicherheit von Kraftfahrzeugen diskutiert und untersucht.^{638,639,640,641} Hierbei nimmt die amerikanische Sicher-

⁶³⁶ Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (2000): Der ADAC Ausweichtest – Nie ohne ESP

⁶³⁷ Auch bekannt unter den Bezeichnungen: *DSC* (Dynamic Stability Control), *ESC* (Electronic Stability Control) und *VSC* (Vehicle Stability Control) sowie markenspezifischen Bezeichnungen, z.B. *PSM* (Porsche Stability Management)

⁶³⁸ Fach et al. (2005): Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme

⁶³⁹ Faulhaber (2003): Wirksamkeit und Akzeptanz des ESP durch Normalfahrer

⁶⁴⁰ Papelis et al. (2004): Study of ESC Assisted Driver Performance Using a Driving Simulator

heitsbehörde NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) in den letzten Jahren international eine führende Rolle ein. Die NHTSA startet nach Forkenbrock⁶⁴² 2004 ein Programm zur Bewertung des Fahrzeugverhaltens mit ESP bzw. zur Definition von geeigneten Open-Loop-Testverfahren zum Nachweis eines „effektiven Stabilisierungssystems“. ⁶⁴³ Die heute von der NHTSA bevorzugten Testmanöver sind der *Sine with dwell* (Sinus mit Verweildauer) und *Fishhook* (Fischhaken) Test. ⁶⁴⁴

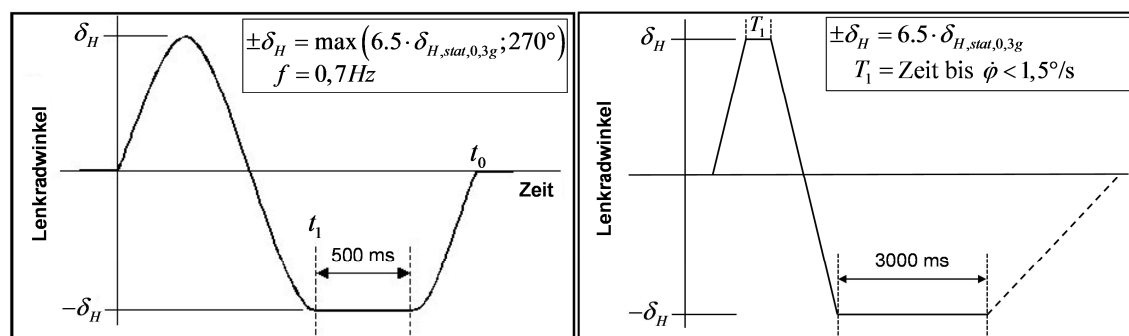


Bild 8.18 Open-Loop-Lenkradwinkeleingaben des Sine with dwell Tests (links)⁶⁴⁵ und des Fishhook Tests (rechts)⁶⁴⁶

Die Lenkeingabe des Sine with dwell Tests nach Bild 8.18 (links) erfolgt mittels Lenkmaschine und besteht aus einer vollen Sinusperiode mit einer festen Frequenz von $f = 0,7 \text{ Hz}$ und einer festen Verweildauer bei Erreichen der zweiten Amplitude von 500 ms. Durch den Sine with dwell Test wird ein Ausweichmanöver auf ein plötzlich auftretendes Hindernis nachgestellt. Die Amplitude des Lenkradwinkels wird ausgehend vom Bereich mittlerer Querbeschleunigungen bis maximal 270° oder dem 6,5-fachen des benötigten Lenkradwinkels $\delta_{H,stat,0,3g}$ für eine stationäre Querbeschleunigung von 3 m/s^2 gesteigert. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt zunächst 80 km/h und kann gesteigert werden. Während der Sine with dwell Test vor allem die Effizienz von elektronischen Regelsystemen zur Stabilisierung des Gierverhaltens zeigen soll, zielt der Fishhook Test auf den Nachweis der Wirksamkeit von Kippvermeidungslogiken.⁶⁴⁷ Aus diesem Grund ist die Lenkeingabe des Fishhook Tests an das Wankverhalten des Testfahrzeugs gekoppelt. Hierbei wird das Lenkrad nach Bild 8.18 (rechts) durch eine Lenkmaschine zunächst mit der festen Lenkgeschwindigkeit von $720^\circ/\text{s}$ aus der Neutralstellung auf das 6,5-fache von $\delta_{H,stat,0,3g}$ eingeschlagen. Kurz vor Erreichen des maximalen

⁶⁴¹ Yamamoto, Kimura (1996): Influence of ABS on Rollover Accidents

⁶⁴² Forkenbrock (2005): NHTSA's Light Vehicle Handling and ESC Effectiveness Research Program

⁶⁴³ Forkenbrock (2005): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program

⁶⁴⁴ Forkenbrock (2008): Test Track Evaluation of Electronic Rollover Mitigation Technology

⁶⁴⁵ NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-5

⁶⁴⁶ NHTSA (2001): Notice of Proposed Rulemaking

⁶⁴⁷ Forkenbrock (2008): Test Track Evaluation of Electronic Rollover Mitigation Technology

Wankwinkels, detektiert durch ein Unterschreiten der Wankgeschwindigkeit $\dot{\phi}$ von 1,5°/s, wird ein Gegenlenken mit einer im Betrag identischer Lenkgeschwindigkeit und Lenkradwinkelamplitude ausgelöst. Die Lenkradwinkelamplitude wird anschließend für eine feste Zeitdauer von 3000 ms gehalten. Durch diese Rückkopplung des Gegenlenkbegins an die Wankbewegung des Fahrzeugs soll die Kombination aus einer starken Wankreaktion und einer anschließend über einen längeren Zeitraum gehaltenen, hohen Querbesehleunigung geprüft werden.⁶⁴⁸ Zur Bewertung der Testergebnisse beider NHTSA Manöver wurden objektive Kriterien definiert.

Bewertungskriterien Fishhook:

Während des Fishhook Tests müssen zu jedem Zeitpunkt mindestens drei Räder direkten Kontakt zur Fahrbahn besitzen. Ist dies nicht der Fall, wird von einem sogenannten „Two Wheel Lift“ (TWL) gesprochen und das Manöver gilt als nicht bestanden. Der TWL ist nach Forkenbrock⁶⁴⁹ die beste Methode zum Nachweis der Wirksamkeit von Kippvermeidungslogiken radschlupfbasierter Regelsysteme. Darüber hinaus sollte kein Felgenkontakt mit der Fahrbahn auftreten und kein Reifendruckverlust erfolgen.⁶⁵⁰

Bewertungskriterien Sine with dwell:

Das Testfahrzeug muss infolge der Lenkeingabe einen ausreichenden Querversatz erzielen und darf nach Forkenbrock nicht ins Schleudern geraten. Diese Zielsetzung wird nach FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) No. 126⁶⁵¹ durch den maximal auftretenden Gierwinkel ψ_{\max} , die verbleibende Gierrate $\dot{\psi}(t_o + 1,0s); \dot{\psi}(t_o + 1,75s)$ zu den Zeitpunkten eine Sekunde und 1,75 Sekunden nach Beendigung der Lenkeingaben (Zeitpunkt t_o) und des erzielten Querversatzes Δy zu Beginn der Verweildauer (t_1) bewertet. Der Querversatz wird mittels Aufintegration der horizontierten Querbesehleunigung $a_{y,h}$ bestimmt.

$$\Delta y(t_1) = \int_0^{t_1} \int_0^{t_1} a_{y,h} dt' dt'' \quad (5.33)$$

Die Anforderungen an die Querstabilität sind erfüllt, wenn der maximale Gierwinkel ψ_{\max} kleiner als 90° bleibt, die Gierrate eine Sekunde nach Beendigung der Lenkeingaben mindestens auf 35 % der maximalen Gierrate $\dot{\psi}_{\max}$ abgefallen ist und nach 1,75 s mindestens auf 20 % der maximal aufgetretenen Gierrate $\dot{\psi}_{\max}$.

⁶⁴⁸ Forkenbrock (2005): NHTSA's Light Vehicle Handling and ESC Effectiveness Research Program

⁶⁴⁹ Forkenbrock (2008): Test Track Evaluation of Electronic Rollover Mitigation Technology

⁶⁵⁰ Forkenbrock (2005): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program

⁶⁵¹ NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-7ff

$$\text{Kriterium 1:} \quad \Delta\psi_{\max} < 90^\circ \quad (5.34)$$

$$\text{Kriterium 2:} \quad \frac{\dot{\psi}(t_o + 1s)}{\dot{\psi}_{\max}} \leq 35\% \quad (5.35)$$

$$\text{Kriterium 3:} \quad \frac{\dot{\psi}(t_o + 1,75s)}{\dot{\psi}_{\max}} \leq 20\% \quad (5.36)$$

Der geforderte Seitenversatz $\Delta y(t_1)$ muss bei Fahrzeugen mit einem zulässigen Gesamtgewicht (zGG) unterhalb von 3500 kg mindestens 1,83 m betragen, oberhalb von 3500 kg zGG genügen hingegen 1,22 m Seitenversatz.

$$\text{Kriterium 4.1 (zGG} \leq 3500 \text{ kg):} \quad \Delta y(t_1) \geq 1,83\text{m} \quad (5.37)$$

$$\text{Kriterium 4.2 (zGG} > 3500 \text{ kg):} \quad \Delta y(t_1) \geq 1,22\text{m} \quad (5.38)$$

Durch die Forderung eines verminderten Seitenversatzes von nur 1,22 m bei schweren Nutzfahrzeugen (zGG > 3500 kg) wird in FMVSS No. 126⁶⁵² einer verringerten Querperformance aufgrund der stärkeren Eingriffe des Regelsystems zur Kippvermeidung bei dieser Fahrzeugklasse Rechnung getragen.

Als ein Resultat des in diesen Tests nachgewiesenen Nutzens von ESP müssen ab dem 1. September 2011 alle neuen Fahrzeugmodelle – bis auf wenige Ausnahmen – in den USA und Kanada mit ESP ausgestattet sein. Ab 1. September 2012 müssen zusätzlich alle Anforderungen aus der FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) No. 126 erfüllt werden, u.a. eine erfolgreiche Absolvierung des Sine with dwell Tests. Das Europäische Parlament folgt der ESP-Pflicht für neue Fahrzeugmodelle ab 1. November 2011 und verabschiedet zusätzlich eine ESP-Pflicht für alle Neuzulassungen ab 1. November 2014. Bereits seit 2009 ist es zudem nicht mehr möglich, die höchste Bewertung („Fünf Sterne“) des renommierten Euro NCAP Testprogramms zur ganzheitlichen Bewertung der Fahrzeugsicherheit zu erhalten, wenn das Fahrzeug nicht mit ESP ausgestattet ist oder trotz verbautem ESP den Sine with dwell Test der NHTSA nicht erfolgreich absolviert hat.^{653,654}

⁶⁵² NHTSA (2007): FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Kapitel II-8ff

⁶⁵³ Euro NCAP (2011): Assessment Protocol – Overall Rating, Version 5.1

⁶⁵⁴ Euro NCAP (2012): Assessment Protocol – Overall Rating, Version 6.0

9 Quellen

- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (<http://www.adac.de>): Der ADAC Ausweichtest – Nie ohne ESP, 2000
- Amberkar, S.; Kushion, M.; Eschtruth, K.; Bolourchi, F.: Diagnostic development for an electric power steering system, SAE Technical Paper 2000-01-0819, 2000
- Armbruster, C.: Fahrdynamikuntersuchung von Fahrspurwechsel mit Längsverzögerung, Diplomarbeit, Hochschule Karlsruhe, 2006
- Bachmann, T.; Bielaczek, C.; Breuer, B.: Der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn und dessen Inanspruchnahme durch den Fahrer, ATZ 97, H.10, 1995, S. 658-667
- Bantle, M.; Braess, H.-H.: Fahrwerksauslegung und Fahrverhalten des Porsche 928, ATZ 79, Nr. 9, 1977
- Baumann, F.-W.: Untersuchungen zur dynamischen Rollstabilität von Personenkraftwagen, Dissertation, Darmstadt, 2003
- Bergman, W.: Measurement and Subjective Evaluation of Vehicle Handling, SAE-Paper 730492, 1973
- Bewersdorff, S.; Pfau, J.; Roeder, S.: Simulation und Bewertung von Fahrdynamikeigenschaften im Grenzbereich, in: Sonderausgabe ATZ und MTZ 1, Springer Verlag, Berlin, Juni 2007, S. 56-59
- Bortz, J.; Schuster, C.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, 7. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- Bösch, P.: Der Fahrer als Regler, Dissertation, Technische Universität Wien, 1991
- Braber, A.; Bukman, E.: Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Verhaltens bei Ausweichmanövern, Diplomarbeit, Hogeschool van Arnhem en Nijmegen, Daimler-Benz AG, Stuttgart, 1998
- Braess, H.-H.; Donges, E.: Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen - "Konsumierbare" oder echte Verbesserungen?, Tagung Aktive Sicherheit, München, 2006
- Braess, H.-H.; Seiffert, U.: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2002
- Braun, H., Ihme, J.: Definition kritischer Situationen im Kraftfahrzeugverkehr – Eine

- Pilotstudie. Automobilindustrie Nr. 3, 1983
- Bruder, R.; Abendroth, B.; Landau, K.: Zum Nutzen von Fahrversuchen für die Gestaltung, erschienen in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007, S. 79-95
- Bruder, R.; Fuchs, K.; Abendroth, B.; Schramm, T.: Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens in Serie und Motorsport, erschienen in: „Wie realitätsnah lässt sich Fahrerverhalten messen?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2009
- Brunkow, D.: Ermittlung von Kennwerten zur objektiven Fahrzeugbeurteilung, Diplomarbeit, FH Esslingen, 1997
- Bubb, H.: Fahrerassistenz primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit?, VDI-Bericht Nr. 1768, Düsseldorf, 2003, S. 257-268
- Bundesministerium für Verkehr: Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen (RSA-95), 4. überarbeitete Auflage, FGSV-Verlag GmbH, Köln, 2001
- Cheng, B.; Fujioka, T.: A hierarchical driver model, in: Proceedings of IEEE Conference on intelligent Transportation Systems, 1997, S. 960-965
- Dettki, F.: Methoden zur Bewertung des Geradeauslaufs von PKW, in: VDI-Bericht 1335, 1997
- Dibbern, K.: Ermittlung eines Kennwertes für den ISO-Fahrspurwechsel in Versuch und Simulation, in: VDI-Fortschrittberichte, Reihe 12, Nr. 164, 1992
- Diebold, L.; Schindler, W.; Haug, J.; Daesch, C.; Lahti, M.: Einspurmodell für die Fahrdynamiksimulation und -analyse, in: ATZ 11/2006, Jahrgang 108, 2006, S. 962-967
- Dietrich, P.: Entwicklung eines Versuchskonzepts zur Bewertung von Stabilisierungsfähigkeiten des Menschen als Kraftfahrzeugführer auf Basis objektiver Fahrdynamiktests, Diplomarbeit, Hochschule Esslingen, 2009
- DIN 70000: Straßenfahrzeuge; Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, Begriffe, modifizierte Ausgabe, 1991
- Donges, E.: A two-level model of driver steering behaviour, in: Human Factors 20, 1978, S. 691-707
- Donges, E.: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen, Automobil-Industrie 27, 1982, S. 183-190
- Donges, E.: Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskriterium für Maßnahmen zur

- Aktiven Sicherheit im Straßenverkehrssystem, in: Das Mensch-Maschine-System im Verkehr, VDI-Berichte 948, Düsseldorf, 1992
- Donges, E.: Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt, Dissertation, TH Darmstadt, 1977
- Donges, E.: Fahrerverhaltensmodelle, in: Winner, H.; Hakuli, S.; Wolf, G.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme, ATZ/MTZ-Fachbuch, Vieweg+Teubner, GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2009, S. 15-23
- Donges, E.; Auffhammer, R.; Fehrer, P.; Seidenfuß, T.: Funktion und Sicherheitskonzept der aktiven Hinterachskinematik von BMW, in: ATZ 92, Nr. 10, 1990
- Donges, E.; Rompe, K.: Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren, TÜV Rheinland, Köln, 1982
- Donges, E.; Wimberger, J.: Performance and Safety Requirements for Auxiliary Steering Equipment explained by means of the Example of BMW's Active Rear-Axle Kinematics (ARK), AVEC Yokohama, 1992
- Dragon, L.: FADYS, ein komplexes Fahrdynamikmodell für echtzeitfähige HIL-Anwendungen, VDI-Berichte 128, 1996, S. 117-130
- Ehlich, J.; Donges, E.; Rompe, K.: Fahrverhalten von PKW bei Einsatz von Noträdern unterschiedlicher Bauart, in: Automobil-Industrie 1983/3
- Enke, K. (1966b): Überlegungen zum Zusammenwirken von Fahrzeuglenker und Automobil, Automobil-Industrie 1, 1966, S. 37-44
- European New Car Assessment Programme (Euro NCAP): Assessment Protocol – Overall Rating, Version 6.0, 2012
- European New Car Assessment Programme (Euro NCAP): Assessment Protocol – Overall Rating, Version 5.1, 2011
- Fach, M.; Breuer, J.; Baumann, F.; Nuessle, M.; Unselt, T.: Objektive Bewertungsverfahren für radbremsenbasierte Systeme der Aktiven Sicherheit, XXV. Internationales μ -Symposium, Bad Neuenahr, 2005, S. 58-80
- Fahrmeir, L.; Kneib, T.; Lang, S.: Regression – Modelle, Methoden und Anwendungen, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- Faulhaber, A.: Wirksamkeit und Akzeptanz des Fahrdynamikregelsystems Electronic Stability Program (ESP) beim Einsatz durch Normalfahrer, Dissertation, TU-Darmstadt, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2003

- Fiala, E.; Wallner, F.: Untersuchung des Systems Fahrzeug-Fahrer bei einer Lenkung mit Zeitvorhalt, Forschungsbericht 47, Institut für Kraftfahrzeugtechnik der TU Berlin, Berlin, 1968
- Fiat: Proposal for Straight-Line and In-A-Turn Braking Test Procedures, ISO/TC 22/SC 9: Vehicle dynamics and road-holding ability, documents 84 and 85, 1975
- Forkenbrock, G.-J. (NHTSA / VRTC): An Overview of NHTSA's 2005 ESC Research Program, 19th ESV Conference, Washington D.C., 2005
- Forkenbrock, G.-J.; Elsasser, D.-H.: (NHTSA / VRTC): A Test Track Evaluation of Electronic Rollover Mitigation Technology, Presentation, 2008
- Forkenbrock, J.; Elsasser, D.-H.; O'Harra, B. (NHTSA): NHTSA's Light Vehicle Handling and ESC Effectiveness Research Program, Traffic Research Center, Inc. United States, Paper Number 05-0221, 2005
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) R1, FGSV-Verlag GmbH, Köln, 2008
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf: Richtlinien für die Anlage von Straßen - Querschnitt (RAS-Q), FGSV-Verlag GmbH, Köln, 1996
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit: Richtlinien für die Markierung von Straßen (RMS-1), FGSV-Verlag GmbH, Köln, 1993
- Förster, H.-J.: Menschliches Verhalten, eine vergessene Ingenieur-Wissenschaft?, Abschlussvorlesung, Uni Karlsruhe, 1987
- Freitag, R.; Moser, M.; Hartl, M.; Koepf, J.; Eckstein, L.: Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen mit Steer-by-Wire Funktionalität, VDI-Berichte Nr. 1646, 2001
- Gründl, M.: Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, Dissertation, Universität Regensburg, 2005
- Grunow, D.; HeiBing, B.; Otto, H.: Testverfahren für Personenkraftwagen mit automatischen Blockierverhinderern beim Bremsen, in: Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik, Heft 280, 1983
- Hackenberg, U.; HeiBing, B.: Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr, ATZ 84, Nr. 7/8, 1982

- Hahlbrock, L.; Heim, C.; Kacza, M.: Die Entstehung des CFK-Fahrsimulators für Daimler, Der INNOVATION REPORT, CFK-Valley Stade e.V., 2011
- Haus, J.; Lauinger, N.: Optische Gitter: Die Abbildung der Realität, in: laser-journal, 4/2007, Nr. 2, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007, S. 39-43
- Heißing, B.; Brandl, H.-J.: Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens, Vogel Fachbuch, Würzburg, 2002
- Heißing, B.; Ersoy, M.: Fahrwerkhandbuch, 2.Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008
- Heißing, B.; Grunow, D.; Rompe, K.: Vergleichende Messungen zum Fahrverhalten von PKW mit Front-, Heck- und Allradantrieb, in: Automobil-Industrie 1982/3
- Heißing, B.; Rompe, K.; Bensinger, J.: Untersuchung der Fahreigenschaften des vier- radgetriebenen Audi Quattro, in: ATZ 85, Nr. 1, 1983
- Hessburg, T.; Tomizuka, M.: Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance, in: Control Systems magazine, 14, 1994, S. 55-63
- Hoffmann, E.R.: Human Control of Road Vehicles, Vehicle System Dynamics, Vol. 5, 1975, S. 105-126
- Horiuchi, S.; Yuhara, N.: An analytical Approach to the Prediction of Vehicle Handling Qualities Using Multi-Input Driver Model, AVEC 96, Aachen, 1996
- Horn, A.: Fahrer - Fahrzeug - Kurvenfahrt auf trockener Straße, Dissertation, TU Braunschweig, 1985
- ISO 12021-1: Road vehicles – Sensivity to lateral wind, First edition, 1996
- ISO 13674-1: Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling – Part 1: Weave test, First edition, 2003
- ISO 14512, Passenger cars - Straight-ahead braking on surfaces with split coefficient of friction – Open-loop test method, 1999
- ISO 17288-1, Passenger cars – Free-steer behaviour – Part 1: Steering-release open-loop test method, First edition, 2002
- ISO 26262-3: Road vehicles – Functional safety – Part 3: Concept phase, 2011
- ISO 3888-1, Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change, First edition, 1999

- ISO 3888-2, Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance, First edition, 2002
- ISO 4138: Road vehicles; steady state circular test procedure, First Edition, 1982
- ISO 7401: Road vehicles; Lateral transient response test methods, 1988
- ISO 7975, Road vehicles – Braking in a turn – Open loop test procedure, 1985 (first version)
- ISO 7975: Passenger cars, Braking in a turn, Open-loop test method, Third edition, 2006
- ISO 9816: Passenger cars – Power-off reaction of a vehicle in a turn – Open-loop test method, 2006 (second edition)
- Jürgensohn, T.: Hybride Fahrermodelle, 1. Auflage, Pro Universitate Verlag, Sinzheim, 1997
- Jürgensohn, T.; Jung, R.; Willumeit, H.P.: Die Handschrift des Lenkens, ATZ 99, Nr.4, 1997
- Kageyama, I.; Pacejka, H.-B.: On a new driver model with fuzzy control, in: Vehicle System Dynamics Supplement, 20, 1991, S. 314-324
- Kageyama, I; Arai, A.; Nomura, T.: An Analysis of Driver's Control Algorithm using Neural Network Modeling, Vehicle System Dynamics Supplement, 33, 1999, S. 122-130
- Keen, S.-D.: Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control, Dissertation, Department of Engineering, University of Cambridge, 2008
- Keinert, R.: Bewertung des Zielkonflikts Fahrstabilität – Fahrperformance, Diplomarbeit, Hochschule Esslingen, 2004
- Knoll, P.-M.; Langwieder, K.: Der Sicherheitsaspekt von ESP in Realunfällen - Überlegungen zum volkswirtschaftlichen Nutzen von prädiktiven Fahrerassistenzsystemen, Tagung Aktive Sicherheit, München, 2006
- Kondo, M.: Directional stability (when steering is added), in: Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan, 7, 1953
- Kraiss, K.-F.; Küttelwesch, H.: Teaching neural networks to guide a vehicle through an obstacle course by emulating a human teacher, in: Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, 1990, S. 333-337

- Kreutz, M.; Horn, M.; Zehetner, J.: Improving vehicle dynamics by active rear wheel steering systems, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 47, No. 12, 2009
- Krochmann, J.: Reaktionszeit von Kraftfahrern, Institut für Lichttechnik, TU Berlin, 1979
- Krüger, H.-P.: Wenn intelligente Systeme intelligente Fahrer unterstützen - Zur Humanisierung der Mensch-Maschine-Kommunikation, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2000, S. 1331-1342
- Kudritzki, D.: Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens, *VDI-Fortschrittberichte*, Reihe 12, Nr. 32, Berlin, 1989
- Kuralay, N.-S.: Einfluss von Fahrwerkselastizitäten und Reifenparametern auf das Fahrverhalten von PKW, in: *Automobil-Industrie* 1986/5
- Lin, M.; Popov, A.A.; McWilliam, S.: Stability and Performance Studies of Driver-Vehicle Systems with Electronic Chassis Control, *Vehicle System Dynamics Supplement* 41, 2004, S. 477-486
- Lincke, W.; Richter, B.; Schmidt, R.: Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling Performance, *SAE-Paper* 730489, 1973
- Lorenz, K.; Dietrich, Ch.; Donges, E.: Einfluß des Sperrdifferentials auf Traktion und Fahrverhalten von Fahrzeugen in Standardbauweise, in: *ATZ* 88, Nr. 2 und 3, 1986
- Lozán, J.-L.; Kausch, H.: *Angewandte Statistik für Naturwissenschaftler*, 4. Auflage, Deutsche Bibliothek –CIP, Hamburg, 2007
- Lugner, P.; Plöchl, M.: Additional 4WS and Driver Interaction, *Vehicle System Dynamics*, 24, 8, 1995, S. 639-658
- Maeda, K.; Sakai, H.; Tomiyama, M.: Analysis of Aerodynamic Effects on the Vehicle Stability in High Speed Running, *AVEC* 96, Aachen, 1996
- Mayr, R.; Freund, E.: On the design of nonlinear path control in automated vehicle guidance, in: *Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on intelligent Robots and Systems*, 1992, S. 613-620
- McAdam, C.-C.: Application of an optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving, in: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-11, S. 393-399, 1981
- McRuer, D.-T.; Allen, R.-W.; Weir, D.-H.; Klein, R.-H.: New results in driver steering control models, in: *Human Factors*, 19, S. 381-397, 1977

- McRuer, D.-T.; Weir, D.-H.; Jex, H.-R.; Magdaleno, R.-E.; Allen, R.-W.: Measurement of driver-vehicle multiloop response properties with a single disturbance input, in: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-5, S. 490-497, 1975
- Meyer-Tuve, H.; Heißing, B.: Ermittlung quantifizierbarer Bewertungen zur Querdynamik über einen modellbasierten Ansatz, erschienen in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007
- Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band C: Fahrverhalten, Springer Verlag, Berlin, 1990
- Mitschke, M.; Marezke, J.; Otto, H.: Untersuchung des Fahrverhaltens von PKW bei Kurvenfahrt, in: Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 466, 1986
- Mitschke, M.; Niemann, K.: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug bei Störung durch schiefziehende Bremsen, ATZ 76, Nr. 3, 1974
- Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge, Springer Verlag, Berlin, 2004
- Mücke, S.; Breuer, J.: Bewertung von Sicherheitssystemen im Fahrversuch, erschienen in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007
- Müller-Beßler, B.; Henze, R.; Küçükay, F.: Reproduzierbare querdynamische Fahrzeugbewertung im doppelten Spurwechsel, in: ATZ 04/2008, Jahrgang 110, 2008, S. 358-365
- Nagai, M.; Onda, M.; Katagiri, T.: Application of genetic algorithm to analysis of driver's behaviour in collision avoidance, Int. Journal of Vehicle Design, Vol. 18, Nr. 6, 1997, S. 626-638
- Neukum, A.: Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop – Zur Brauchbarkeit des korrelativen Ansatzes, in: Becker, K.: Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II, expert verlag, Renningen, 2002, S. 1-20
- Neukum, A.: Controllability of erroneous steering torque interventions: Driver reactions and influencing factors, chassis.tech plus, München, 2010
- Neukum, A.; Krüger, H.-P.: Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungs-Methodik und Bewertungskriterien, VDI-Berichte 1791, 2003, S. 297-318
- Neukum, A.; Krüger, H.-P.; Frömmig, L.; Henze, R.; Küçükay, F.: Wirkung diskreter Zusatzlenkmomente: Subjektive Bewertung und Fahrer-Fahrzeug-Interaktion, Fachtagung „Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen“, 4 - Haus der Technik Fach-

buch, 2010

Neukum, A.; Krüger, H.-P.; Schuller, J.: Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften? VDI-Bericht Nr. 1613, 2001

Neukum, A.; Leonhard, A.; Lübbecke, T.; Ufer, E.; Krüger, H.-P.; Engels, F.; van der Jagt, P.: Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei fehlerhaften Eingriffen eines EPS-Lenksystems, VDI-Berichte Nr. 2085, 2009

Neukum, A.; Ufer, E.; Paulig, J.; Krüger, H.-P.: Controllability of superposition steering system failures, steering.tech, München, 2008

NHTSA: FMVSS No. 126, Electronic Stability Control Systems, Final Regulatory Impact Analysis, 2007

NHTSA: Notice of Proposed Rulemaking, Docket No. NHTSA-2001-9663; Notice 2, 2001

NHTSA; Dang, J.: Preliminary Results Analysing the Effectiveness of Electronic Stability Control Systems (ESC), Evaluation Note, DOT HS 809 790, 2004

Oberdieck, W.; Richter, B.; Zimmermann, P.: Identifizierung nichtlinearer Fahrzeugeigenschaften, in: Automobilindustrie 1980/2

Opelka, J.-M.: Simulationsbasierte Optimierung von ESP-Eingriffen unter Berücksichtigung objektiver Stabilitätsgrenzwerte in der Fahrsicherheit, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2011

Otto, H.: Lastwechselreaktionen von PKW bei Kurvenfahrt, Dissertation, TU Braunschweig 1987

Panhorst, T.: Objektive und Subjektive Beurteilung des Seitenwindverhaltens von PKW, Diplomarbeit, DaimlerChrysler AG, Sindelfingen, 2002

Papelis, Y.-E.; Brown, T.; Watson, G.; Holtz, D.; Pan, W.: Study of ESC Assisted Driver Performance Using a Driving Simulator, SAE World Congress, Doc.-Nr. 04-003-PR, Detroit, 2004

Plöchl, M.; Edelmann, J.: Driver models in automobile dynamics application, Vehicle System Dynamics, Vol. 45, Nr. 7–8, 2007, S. 699-741

Rashevsky, N.: Neglected Factors in Highway Safety, University of Michigan, Mental Health Research Institute, Grant GM-12032-01, 1966

Rasmussen, J.: Skills, rules and knowledge; Signals, signs and symbols and other distinctions in human performance models. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 13, 1983, S. 139-193

- Rau, M.: Koordination aktiver Fahrwerk-Regelsysteme zur Beeinflussung der Querdynamik mittels Verspannungslenkung, Dissertation, Uni Stuttgart, 2007
- Reichelt, W.: Identifikationsmethoden für die Fahrdynamik, in: ATZ86, Nr. 9, 1984
- Reimpell, J.; Sponagel, P.: Fahrwerktechnik: Reifen und Räder, 2. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1988
- Riedel, A.; Arbinger, R.: Subjektive und Objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von PKW. FAT Schriftenreihe 139, 1997
- Riekert, P.; Schunck, T.E.: Zur Fahrmechanik des gummibereiteten Kraftfahrzeugs, Ingenieurs-Archiv, 1940
- Robert Bosch GmbH: Fahrstabilisierungssysteme, Plochingen, 2004
- Rompe, K.: Möglichkeiten und Grenzen objektiver Fahrverhaltens-Tests von Kraftfahrzeugen, in: ATZ 84, Nr. 1, 1982
- Rompe, K.: Testverfahren für das Bremsen in der Kurve, Kolloquiumsreihe "Aktive Sicherheit", TÜV-Verlag, 1978
- Rompe, K.; Donges, E.: Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen, in: Automobil-industrie 1983/2
- Rompe, K.; Ehlich, J.: Zum Stand der objektiven Bewertung von Reifen- und Fahrwerkseigenschaften, in: VDI Berichte 650, 1987
- Rompe, K.; Grunow, D.: Fahrverhalten von PKW beim Bremsen in der Kurve auf nassen Fahrbahnen, in: Automobil-Industrie 1980/4
- Rompe, K.; Grunow, D.; Tupová, J.: Erprobung eines Testverfahrens für das Bremsen in der Kurve und Ermittlung geeigneter Bewertungskriterien, VDI Bericht Nr.262, Düsseldorf, 1980
- Rompe, K.; Heißing, B.: Möglichkeiten zur Bewertung der Fahreigenschaften, "Bewertungsverfahren für die Sicherheit von Personenwagen", TÜV-Verlag, 1984
- Rompe, K.; Heißing, B.: Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen: Quer- und Längsdynamik, 1. Auflage, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1984
- Rönitz, R.: Bewertungskriterien zum Fahrverhalten von PKW - Eine Übersicht, Kolloquiumsreihe "Aktive Sicherheit", TÜV Rheinland, 1978
- Rundkuist, S.: Swedish Experimental Safety Vehicle Program: Steerability During

- Emergency Braking, Summary Report, 1974
- Sachs, L.; Hedderich, J.: Angewandte Statistik, 13. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009
- Sagan, E.: Ansätze zur objektiven Fahrdynamik, in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007, S. 17-29
- Schick, B.; Bunz, D.; TÜV Automotive GmbH, TÜV SÜD Gruppe: Gierstabilität beim Kurvenbremsen aus hohen Geschwindigkeiten, VDI-Berichte Nr. 1912, München, 2005
- Schmid, A.; Förschl, S.: Vom realen zum virtuellen Reifen – Reifenmodellparametrierung, ATZ 03/2009, S. 188-193
- Schmidt, G.: Wann spürt der Fahrer überhaupt? Der Einfluss des Fahrmanövers auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten als haptische Signale im Fahrzeug, VDI-Berichte 2015, 2007
- Schmidt, G.; Scholz, S.; Neukum, A.; Krüger, H.-P. (IZVW); Passek, J.; Schrüllkamp, T.; Wallentowitz, H. (ika): Fahrer- Fahrzeug-Wechselwirkungen bei Fahrmanövern mit Querdynamikbeanspruchungen und zusätzlichen Vertikaldynamikstörungen, FAT-Schriftenreihe 208, VDA, 2006, S. 52-102
- Schmidt, G.; Switkes, J.-P.; Kiss, M.; Gerdes, J.-C.: Auswirkung haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug-System, in: GZVB (Ed.), AAET 2007, Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, Braunschweig, 2007
- Schmidtke, H.; Bernotat, R.; Ergonomie, 3. Auflage, Hanser Verlag, München, 1993
- Schöggl, P.: Objektivierung und Optimierung des subjektiven Fahrempfindens in Serie und Motorsport, erschienen in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007
- Scholz, R.; Eitzinger, S.; Kober, W.; Rosinger, W.: Aktive Fahrwerkssysteme am Beispiel einer neuen Hinterachslenkung ...hilft es auch dem Reifen?, 6. Tag des Fahrwerks, Aachen, 2008
- Schurmann, J.: On the use of discrete proprioceptive-tactilewarning systems during manual control - The steering wheel as an active controller device, Dissertation, Hochschule der Bundeswehr München, Waxmann Verlag, Münster, 1994
- Simmermacher, D., Winner, H.: Lane Keeping Ability of normal Drivers depending on selectively varied Yaw Rate Deviation in Braking Manoeuvres, EAEC 2011, Valencia

- Simmermacher, D.; Winner, H.: Beherrschbarkeit von Gierstörungen durch ein Fahrer-kollektiv, in: ATZ 113, Nr. 9, 2011, S. 696-701
- Song, B.; Delorme, B.; VanderWerf, J.: Cognitive and hybrid model of human driver, in: Proceedings of the intelligent Vehicles Symposium, 2000, S. 1-6
- Stanczyk, T.-L.; Jurecki, R.: Fahrerreaktionszeiten in Unfallrisikosituationen - neue Fahrbahn- und Fahrsimulatorversuche, erschienen in: VKU, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2008
- Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle 2010, Fachserie 8, Reihe 7, Wiesbaden, 2011
- Stetter, H.: Meßtechnik an Maschinen und Anlagen, Vieweg+Teubner Verlag, Stuttgart, 1992
- Stonex, K.-A.: Car Control Factors and their Measurement, SAE Technical Paper 410092, 1941
- Switkes, J.-P.: Handwheel force feedback with lanekeeping assistance: Combined dynamics, stability and bounding, Dissertation, Stanford University, 2006
- Switkes, J.-P.; Schmidt, G.; Kiss, M.; Gerdes, J.-C.: Driver response to steering torque disturbances: A user study on assisted lanekeeping, IFAC Symposium on Advances in Automotive Controls (AAC) 2007, Monterey Coast, 2007
- Thies, A.; Krimmel, H.; Pollmeyer, S.: Funktionales Zusammenspiel von Fahrwerk und Antrieb, Potenziale für Fahrdynamik und Fahrsicherheit, chassis.tech 2009, München, 2009
- Tuzar, G.-D.: Der Einfluss von Fahrversuchen auf das Human-Machine-Interaction-Design in Fahrzeugen, erschienen in: „Wie objektiv sind Fahrversuche?“, Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug, ergonomia Verlag, Stuttgart, 2007
- Uffellmann, F.: Lastwechselreaktion des frontgetriebenen PKW bei Kurvenfahrt, VDI-Berichte 418, 1981
- Ullmann, S.: Der Normalfahrer als Messgröße für die Optimierung und Absicherung aktiver fahrdynamischer Regelsysteme, Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, München, 2006
- Ungoren, A.-Y.; Peng, H.: An adaptive lateral preview driver model, in: Vehicle Systems Dynamics, 43, 2005, S. 245-259
- Vögel, M.; von Stryk, O.; Bulirsch, R.; Wolter, T.-M.; Chucholowski, C.: An optimal control approach to real-time vehicle guidance, in: Mathematics - Key Technology for the Future, Springer Verlag, Berlin, 2003, S. 84-102

- von Glasner, E.-C.: Fahrdynamische Versuche und Messwerte zur Bewertung der aktiven Fahrzeugsicherheit, erschienen in: VKU, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1/2009, S. 12-20
- Vorndran, I.: Unfallgeschehen im Straßenverkehr 2006, Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 2007
- Wallentowitz, H.; Brand, W.; Holle, M.; Schrüllkamp, T.: Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung, Tag des Fahrwerks, Aachen, 2002
- Wallner, F.: Zum Verhalten des Fahrzeuglenkers als regelungstechnisches Problem, Automobilindustrie 1/1967, S. 54-62
- Wegscheider, M.; Prokop, G.: Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrer-Assistenzsystemen, VDI-Bericht Nr. 1900, 2005, S. 17-36
- Weir, D.-H.; Di Marco, R.-J.: Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data, SAE-Paper 780010, 1978
- Weir, D.-H.; Zellner, J.-W.: The Application of Handling Requirements to an RSV-Type Vehicle, SAE-Paper 770187, 1977
- Weiß, E.: Untersuchung und Rekonstruktion von Ausweich- und Fahrspurwechselvorgängen, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 96, Düsseldorf, 1988
- Wenzel, T.-A.; Burnham, K.-J.; Williams, R.-A.; Blundell, M.-V.: Closed-Loop Driver/Vehicle Model for Automotive Control, 18th International Conference on Systems Engineering, Las Vegas, Nevada, 2005
- Wesp, A.: Analyse fahrerwirksamer Systemauslegungen und -störungen eines Fahrzeugs mit Hinterradlenkung bei gleichzeitiger Fahrerbeanspruchung durch eine Fahraufgabe, Dissertation, VDI Fortschritt-Berichte Nr. 741, Düsseldorf, 2011
- Wesp, A.; Stoff, A.; Winner, H.: Die Systemauslegung von hinterachsgelenkten Fahrzeugen als Einflussgröße auf die Fahrerbewertung im Makrosinusversuch und Spurwechsel, Haus der Technik Fachbuch 4, expert Verlag, Renningen, 2009
- Wesp, A.; Stoff, A.; Winner, H.: Einfluss der Systemauslegung hinterachsgelenkter Fahrzeuge auf die Bewertung von Fahrern im Makrosinusversuch, in: 12. Internationale VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn, Hannover, 2009
- Wilfert, K.: Sicherheitsprobleme bei der Entwicklung von Personenwagen, ATZ, 1967 S. 48-53
- Willmes-Lenz, G.: Internationale Erfahrung mit neuen Ansätzen zur Absenkung des Unfallrisikos junger Fahrer und Fahranfänger, Berichte der Bundesanstalt für Stra-

- Benwesen, Heft M 144, 2003
- Willumeit, H.-P.; Jürgensohn, T.: Fahrermodelle - ein kritischer Überblick, Teil 1 und 2, in: Automobiltechnische Zeitschrift ATZ, Nr. 99, 1999
- Willumeit, H.-P.; Matheis, A.; Müller, K.: Korrelation von Untersuchungsergebnissen zur Seitenwindempfindlichkeit eines Personenwagens im Fahrsimulator und Prüffeld, in: ATZ 93, Nr. 1, 1991
- Willumeit, H.-P.; Müller, K.; Dödlbacher, G.; Loos, H.: Verfahren zur Korrelation von Fahrzeugverhalten und Fahrerbeurteilung bei Seitenwind, Tagung Fahrwerktechnik, Haus der Technik Essen, 1986
- Witte, K.: Stabilisierung der Gierbewegung in kritischen Fahrzuständen, Dissertation, TU Berlin, 1995
- Xi, G., Qun, Y.: Driver-vehicle-environment closed-loop simulation of handling and stability using fuzzy control theory, in: Vehicle System Dynamics Supplement, 23, 1994, S. 172-183
- Yamamoto, A.; Kimura, Y.: Influence of ABS on Rollover Accidents, 15. ESV-Konferenz, Paper-Nr.: 96-55-O-04, Washington, 1996
- Zadeh, G.-A.; Fahim, A.; El-Gindy, M.: Neural network and fuzzy logic applications to vehicle systems: literature survey, in: International Journal of Vehicle Design, 18, 1997, S. 132-193
- Zeyada, Y., El-Beheiry, E.; El-Arabi, M.; Karnopp, D.: Driver modeling using fuzzy logic controls for human-in-the-loop vehicle simulations, in: Current Advances in Mechanical Design and Production VII, Elsevier Science Ltd., Oxford, 2000
- Zomotor, A.: Meßverfahren bei der Auslegung des Fahrverhaltens, Automobilindustrie 1978/2, TÜV-Verlag, 1978
- Zomotor, A.; Braess, H.-H.; Rönitz, R.: Doppelter Fahrspurwechsel – Eine Möglichkeit zur Beurteilung des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen?, in: ATZ 76, Nr. 8, 1974
- Zomotor, A.; Braess, H.-H.; Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen – Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre, Teil 1/2, ATZ 12/97 und 03/98, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1997/1998
- Zomotor, A.; Braess, H.-H.; Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen – Stand und Problematik, Teil 1/2, Automobil-Industrie 1/1977 und 3/1977, 1977
- Zomotor, A.; Horn, A.; Rompe, K.: Bremsen in der Kurve - Untersuchung eines Test-

verfahrens, in: ATZ 82, Nr. 9, 1980

Zomotor, A.; Kuhn, W.: Beitrag zur Verbesserung der Aktiven Sicherheit von Personenwagen-Caravan-Zügen, in: ATZ 84, Nr. 11, 1982

Zomotor, A.; Reimpell, J.: Fahrwerktechnik: Fahrverhalten, 2. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1991

Zomotor, A.; Richter, K.-H.; Kuhn, W.: Untersuchungen über die Stabilität und das aerodynamische Störverhalten von PKW-Wohnanhängerzügen, in: Automobil-Industrie 1982/3

Zschocke, A.-K.: Ein Beitrag zur objektiven und subjektiven Evaluierung des Lenkkomforts von Kraftfahrzeugen, Dissertation, Forschungsbericht des Instituts für Produktentwicklung Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2009

Lebenslauf

Dipl.-Ing. Daniel Simmermacher

D-80799 München

- Adresse aus Gründen des Datenschutzes gekürzt -

- **Persönliche Daten**

Geburtsdatum: 27.01.1982

Geburtsort: Gießen

Familienstand: ledig

Staatsangehörigkeit: deutsch

- **Schulische Ausbildung**

1988 – 1992 Grundschole Lauterbach

1992 – 2001 Alexander-von-Humboldt-Schule Lauterbach

2001 Allgemeine Hochschulreife

- **Wehrdienst**

2001 – 2002 Nachschubausbildungszentrum 50
Treysa

- **Studium**

2002 – 2008 Allgemeiner Maschinenbau, TU Darmstadt

2008 Abschluss als Diplom-Ingenieur

- **Berufliche Tätigkeit**

2008 – 2011 Doktorand bei der Daimler AG, Sindelfingen
Bereich: Fahrdynamik/Fahrsicherheit

seit August 2011 Entwicklungsingenieur Fahrdynamik/Fahrerassistenz,
BMW AG, München